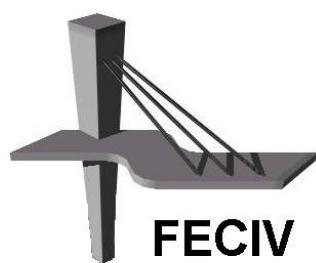


DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DO SISTEMA DE LEITO DE
DRENAGEM COMO TRATAMENTO DE LODO DA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA BOM JARDIM EM
UBERLÂNDIA -MG**





UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Bruna Santos

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DO SISTEMA DE LEITO DE
DRENAGEM COMO TRATAMENTO DE LODO DA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA BOM JARDIM EM UBERLÂNDIA -MG**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. André Luiz de Oliveira

Uberlândia, 19 de Dezembro de 2012.



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA Nº: 105/2013

CANDIDATA: Bruna Santos

ORIENTADOR: Prof. Dr. André Luiz de Oliveira

TÍTULO: "Avaliação do sistema de leito de drenagem aplicado ao tratamento de lodo da estação de tratamento de água bom jardim em Uberlândia-MG"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana

LINHA DE PESQUISA: Planejamento e Infraestrutura Urbana

DATA DA DEFESA: 18 de janeiro de 2013

LOCAL: Sala de Reunião da FECIV

HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA: 14:15 - 16:00

Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às arguições, os membros da Banca Examinadora decidem que a candidata foi:

APROVADA

REPROVADA

OBS:

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:

Professor Orientador: Prof. Dr. André Luiz de Oliveira – FECIV/UFU

Prof. a Dr. a Angela Maria Soares

Membro externo: Prof. a Dr. a Angela Maria Soares - UFTM

Prof. a Dr. a Ana Luiza Ferreira Campos Maragno

Membro: Prof. a Dr. a Ana Luiza Ferreira Campos Maragno – FECIV/UFU

À Deus todo louvor, honra e glória.

Agradecimentos

À Deus pelo sustento e perseveranças a mim dadas para a conclusão deste trabalho.

À minha família, meus pais Valdir e Celina pelo exemplo de honestidade, humildade e apoio. Aos irmãos Marília e Júnior que assim como os meus pais me apoiaram nos momentos de alegria e tristeza e estiveram sempre presentes e dispostos a me ajudar.

Aos professores José Eduardo Alamy Filho e André Luiz de Oliveira pelo apoio e conhecimentos compartilhados.

Ao meu amado esposo que sempre com carinho e compreensão me apoiou e que apesar da distância foi um companheiro, amigo e conselheiro fiel.

Aos meus amigos Aline, Jéssica e Hugo, os quais foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho e estavam sempre dispostos a colaborar.

Aos amigos de mestrado da FECIV pela convivência e amizade.

As empresas MACCAFERI e BIDIM pelo fornecimento dos geotêxteis utilizados neste trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

... mas os que confiam no Senhor recebem sempre novas forças.
Voam nas alturas como águias, correm e não perdem as forças,
andam e não se cansam.

Isaías 40:31

RESUMO

No Brasil, a produção de resíduos pelas Estações de Tratamento de Água representa cerca de 1 a 4 % do volume de água tratada. Ainda são poucas as Estações de Tratamento de Água (ETA) que tem sistemas de tratamento ou de desaguamento de lodo no Brasil, (aproximadamente 0,5 % das ETAs). A grande preocupação com os resíduos das ETAs é quanto ao lançamento indiscriminado destes resíduos diretamente nos corpos de água, uma vez que esta prática está relacionada com a redução da qualidade da água bruta além da formação de um ciclo vicioso caracterizado pelo consequente aumento do uso de produtos químicos no tratamento da água e a geração de um crescente volume de resíduos. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo a avaliação do desempenho das fases de drenagem e secagem do desaguamento de lodo da ETA Bom Jardim pelo sistema natural de desaguamento Leito de Drenagem (LD). Para tanto, foram realizados testes preliminares com 16 mantas geotêxteis, a partir das quais foram selecionadas três que foram utilizadas para a composição dos Leitos de Drenagem nas etapas seguintes. Logo, os sistemas naturais foram avaliados quando submetidos às taxas de aplicação de sólidos (TAS) de $1,75 \text{ kg.m}^{-2}$, $3,5 \text{ kg.m}^{-2}$, e $7,0 \text{ kg.m}^{-2}$, tanto na fase de drenagem quanto na fase de secagem. Na fase de drenagem foram avaliados parâmetros como cor verdadeira, cor aparente, turbidez, metais pesados (Fe, Pb, Cd, Cr, Al e Mn), DQO e DBO. Na fase de secagem os Leitos de Drenagem foram avaliados em duplicata, sendo um sistema parcialmente protegido das variáveis climáticas e o outro totalmente exposto, a partir dos quais foram analisadas a influência das variáveis climáticas no desaguamento do lodo. Após realização do trabalho foi possível verificar a grande influência destas variáveis no funcionamento do sistema, visto que o lodo do sistema parcialmente protegido apresentou em todos os experimentos, considerando-se o mesmo tempo de operação, valores bem inferiores de porcentagem de sólidos. A avaliação comparativa dos ensaios com as TAS de $1,75 \text{ kg.m}^{-2}$, $3,5 \text{ kg.m}^{-2}$, e $7,0 \text{ kg.m}^{-2}$, demonstraram que os melhores resultados foram obtidos utilizando-se a manta geotêxtil RT-31 com TAS de $3,5 \text{ kg.m}^{-2}$. O efluente do drenado apresentou 0,93 UNT de turbidez e ao final dos sete dias de tempo de secagem o lodo retido no Leito de Drenagem totalmente exposto apresentou teor de sólidos 68,3 % maior que nos sistemas com envoltório.

Palavras chaves: Estação de Tratamento de Água (ETA), Leito de Drenagem, geotêxteis, lodo.

ABSTRACT

In Brazil, the Water Treatment Plants generates about 1 to 4 % of the waste volume compared to the volume of treated water. Although there are few WTP that have sludge treatment systems in Brazil, approximately 0.5 % of the WTP. Also in Brazil the major concern with the generation of waste by the Water Treatment Plants (WTP) is about the waste launching indiscriminate directly into waterbodies, mainly surface water sources. Since the launch of residues in surface waters there is a reduction in the quality of brute water and the formation of a vicious cycle characterized by the consequent increase in the use of chemicals in water treatment and the generation of an increasing volume of waste. In this sense this work have the objective to evaluate the performance of drainage and drying phases of the sludge from the WTP Bom Jardim by the sludge dewatering natural system Draining Bed (DB). For this, preliminary assays were performed with 16 geotextils, from these tests were selected three geotextiles which were used for the composition of Draining beds in the next assays. Therefore, the natural systems were evaluated when subjected to Application Rates of Solids (ARS) 1.75 kg.m^{-2} , 3.5 kg.m^{-2} and 7.0 kg.m^{-2} . Each assay was analyzed on drain and drying phases. In the drainage phase were evaluated parameters as true color, apparent color, turbidity, heavy metals (Fe, Pb, Cd, Cr, Al and Mn), COD and BOD. In the drying phase, the Draining Beds were evaluated in duplicate, so a system partially protected from climatic variables and the other completely exposed, the basis of which we analyzed the influence of climatic variables on sludge dewatering. Therefore, we found the great influence of these variables in the system, since the sludge of the system partially protected in all experiments presented well below percentage of solids, considering the same operation time. The comparative evaluation test with TAS 1.75 kg.m^{-2} , 3.5 kg.m^{-2} and 7.0 kg.m^{-2} , demonstrate that best results were obtained using the geotextile RT- 31 with ARS of 3.5 kg.m^{-2} . The effluent had drained with 0.93 NTU of turbidity and the end of the seven days of drying time retained in the Draining Bed without wrap had 68.3 % lower levels of solids than in systems with wrap.

Key words: Water Treatment Plants (WTP), Draining Bed, geotextiled, sludge.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação das águas superficiais.....	6
Quadro 2 - Subclassificação das águas superficiais.	7
Quadro 3 - Definição e importância das micropropriedades de lodos de ETAs.	11
Quadro 4 – Geotêxteis avaliados para a composição dos Leitos de Drenagem.	31

LISTA DE **F**IGURAS

Figura 1 - Estação de Tratamento de Água Bom Jardim.....	28
Figura 2 – Sistema para desenvolvimento do teste para seleção das mantas geotêxteis a serem aplicadas no LD.....	32
Figura 3–Projeto e a aplicação do sistema de LD.	33
Figura 4 - Volume de água livre drenada nos Leitos de Drenagem compostos pelas manta RT-21, RT-26 e RT-31, à TAS = 1,75 kg.m ⁻²	44
Figura 5 – Dados de volume, turbidez, cor verdadeira e cor aparente ao longo do tempo de drenagem da manta RT-21 submetida à TAS = 1,75 kg.m ⁻²	45
Figura 6 - Dados de volume, turbidez, cor verdadeira e cor aparente ao longo do tempo de drenagem da manta RT-26 submetida à TAS = 1,75 kg.m ⁻²	45
Figura 7 - Dados de volume, turbidez, cor verdadeira e cor aparente ao longo do tempo de drenagem da manta RT-31 submetida à TAS = 1,75 kg.m ⁻²	46
Figura 8 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-21, submetida à TAS = 1,75 kg.m ⁻² ,com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.	48
Figura 9 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-26, submetida à TAS = 1,75 kg.m ⁻² ,com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.	49
Figura 10 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-31, submetida à TAS = 1,75 kg.m ⁻² ,com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.	50

Figura 11 - Volume de água livre drenada nos Leitos de Drenagem compostos pelas manta RT-21, RT-26 e RT-31, a TAS = 3,5 kg.m ⁻²	54
Figura 12 - Dados de volume, turbidez, cor verdadeira e cor aparente ao longo do tempo de drenagem da manta RT-21 submetida à TAS = 3,5 kg.m ⁻²	55
Figura 13 - Dados de volume, turbidez, cor verdadeira e cor aparente ao longo do tempo de drenagem da manta RT-26 submetida à TAS = 3,5 kg.m ⁻²	56
Figura 14 - Dados de volume, turbidez, cor verdadeira e cor aparente ao longo do tempo de drenagem da manta RT-31 submetida à TAS = 3,5 kg.m ⁻²	56
Figura 15 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-21, submetida à TAS = 3,5 kg.m ⁻² , com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.	58
Figura 16 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-26, submetida à TAS = 3,5 kg.m ⁻² , com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.	59
Figura 17 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-31, submetida à TAS = 3,5 kg.m ⁻² , com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.	60
Figura 18 - Volume de água livre drenada nos Leitos de Drenagem compostos pelas manta RT-21, RT-26 e RT-31, a TAS = 7,0 kg.m ⁻²	65
Figura 19 - Dados de volume, turbidez, cor verdadeira e cor aparente ao longo do tempo de drenagem da manta RT-21 submetida à TAS = 7,0 kg.m ⁻²	66
Figura 20 - Dados de volume, turbidez, cor verdadeira e cor aparente ao longo do tempo de drenagem da manta RT-26 submetida à TAS = 7,0 kg.m ⁻²	66

Figura 21 - Dados de volume, turbidez, cor verdadeira e cor aparente ao longo do tempo de drenagem da manta RT-31 submetida à TAS = 7,0 kg.m ⁻²	67
Figura 22 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-21, submetida à TAS = 7,0 kg.m ⁻² , com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.	69
Figura 23 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-26, submetida à TAS = 7,0 kg.m ⁻² , com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.	70
Figura 24 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-31, submetida à TAS = 7,0 kg.m ⁻² , com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.	71
Figura 25 – Dados comparativos entre as mantas geotêxteis RT-21, RT-26 e RT-31 submetidos a TAS=1,75kg.m ⁻² ao longo do tempo.	73
Figura 26 - Dados comparativos entre as mantas geotêxteis RT-21, RT-26 e RT-31 submetidos a TAS=3,5kg.m ⁻² ao longo do tempo.	74
Figura 27 - Dados comparativos entre as mantas geotêxteis RT-21, RT-26 e RT-31 submetidos a TAS=7,0kg.m ⁻² ao longo do tempo.	75
Figura 28 - Dados comparativos entre as TAS 1,75kg.m ⁻² , 3,5kg.m ⁻² e 7,0kg.m ⁻² para a manta RT-21.....	76
Figura 29 - Dados comparativos entre as TAS 1,75kg.m ⁻² , 3,5kg.m ⁻² e 7,0kg.m ⁻² para a manta RT-26.	77
Figura 30 - Dados comparativos entre as TAS 1,75kg.m ⁻² , 3,5kg.m ⁻² e 7,0kg.m ⁻² para a manta RT-31.....	78

Figura 31 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-31, submetida à TAS=7,0kg.m⁻², com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.85

LISTA DE **T**ABELAS

Tabela 1 - Valores dos parâmetros de qualificação da água (media +/- desvio padrão)	10
Tabela 2 - Micropropriedades do lodo da ETA Bom Jardim e valores dos parâmetros estabelecidos pela COPAM/CERH-MG (2008) e CONAMA 430 (2011) para o descarte de efluentes nos corpos hídricos.....	38
Tabela 3 – Mantas geotêxteis não utilizadas por apresentarem valores extremos de TDD ou até turbidez.	39
Tabela 4 - Dados referente à análise do Tempo de drenagem e turbidez de 50mL seguida da análise também dos próximos 50mL de drenado.	40
Tabela 5-Especificações técnicas dos geotêxteis avaliados nos Leitos de Drenagem	40
Tabela 6 - Dados referentes ao perfil de drenagem do lodo da ETA Bom Jardim, quando submetido ao desaguamento por LD constituído pela manta RT-21.....	42
Tabela 7 - Dados referentes ao perfil de drenagem do lodo da ETA Bom Jardim, quando submetido ao desaguamento por LD constituído pela manta RT-26.....	42
Tabela 8 - Dados referentes ao perfil de drenagem do lodo da ETA Bom Jardim, quando submetido ao desaguamento por LD constituído pela manta RT-31.....	43
Tabela 9 - Dados referentes ao perfil de drenagem do lodo da ETA Bom Jardim, quando submetido ao desaguamento por LD constituído pela manta RT-21.....	53
Tabela 10 - Dados referentes ao perfil de drenagem do lodo da ETA Bom Jardim, quando submetido ao desaguamento por LD constituído pela manta RT-26.....	53
Tabela 11 - Dados referentes ao perfil de drenagem do lodo da ETA Bom Jardim, quando submetido ao desaguamento por LD constituído pela manta RT-31.....	53

Tabela 12 - Dados referentes ao perfil de drenagem do lodo da ETA Bom Jardim, quando submetido ao desaguamento por LD constituído pela manta RT-21.....	63
Tabela 13 - Dados referentes ao perfil de drenagem do lodo da ETA Bom Jardim, quando submetido ao desaguamento por LD constituído pela manta RT-26.....	63
Tabela 14 - Dados referentes ao perfil de drenagem do lodo da ETA Bom Jardim, quando submetido ao desaguamento por LD constituído pela manta RT-31.....	64
Tabela 15 - Micropropriedades do lodo e da água livre drenada pelo LD (Ensaio VI), com e sem descarte dos primeiros 15 min. De drenagem.	81
Tabela 16–Micropropriedades da água livre drenada pelo LD (Ensaio VI) e valores dos parâmetros estabelecidos para água potável segundo a Portaria nº 2.914 do MS (2011).	82
Tabela 17 - Micropropriedades da água livre drenada pelo LD (Ensaio VI) e valores dos parâmetros estabelecidos para o descarte de efluentes diretamente nos cursos de água, resolução CONAMA 430 (2011) e pela COPAM/CERH-MG (2008).	83
Tabela 18 - Ação das variáveis climáticas no processo de desidratação do lodo.....	88

LISTA DE **A**BREVIATURAS E **S**IGLAS

ANA	Agência Nacional de Água
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgoto
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
EUA	Estados Unidos da América
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LD	Leito de Drenagem
MG	Minas Gerais
MS	Ministério da Saúde
OD	Oxigênio Dissolvido
ONU	Organização das Nações Unidas
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNSB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PVC	Poli Cloreto de Vinila
QTDE	Quantidade
ST	Sólidos Totais
TAS	Taxa Hidráulica de Aplicação de Sólidos
TCS	Taxa de Descarga de Sólidos
TDD	Tempo de Drenagem
UNT	Unidade Nefelométrica de Turbidez

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Percentual
ΔH	Perda de carga total
%o	Por milhar
A	Área exposta
Af	Área de fundo
Al	Alumínio
C	Comprimento
Cd	Cádmio
Ce	Emissividade da superfície aquecida
Cr	Cromo
F	Fator de correção da temperatura
Fe	Ferro
h	Hora
hcd	Coeficiente de transferência de calor por condução
hcv	Coeficiente de transferência por convecção
K	Condutividade hidráulica
k	Unidade de temperatura Kelvin
$\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$	Quilograma por litro
$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	Quilograma por metro quadrado
$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$	Quilojoule por metro quadrado
km	Quilômetros
L	Litro
$\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	Litros por minuto
$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Metros por segundo
m^2	Metros quadrados
$\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$	Metros cúbicos por dia
$\text{m}^3 \cdot \text{l}^{-1}$	Metros cúbicos por litro
$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Metros cúbicos por Segundo
$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Miligrama por litro
$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Miligramas por litro
mL	Mililitros

$\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$	Milímetros por minuto
mm	Milímetros
Mn	Manganês
O_2	Oxigênio
$^{\circ}\text{C}$	Graus Célsius
Pb	Chumbo
pH	Potencial Hidrogeniônico
Pt.L^{-1}	Escala platina cobalto
Q	Vazão
Q_{cd}	Calor transferido por condução
Q_{cv}	Calor transferido por convecção
Q_{rd}	Calor transferido por radiação
R	Massa do recipiente com água a 4°C
S	Massa total do recipiente com lodo
SG	Peso específico
St	Constante de Stefan Boltzman
T	Temperatura
t	Tempo
T_g	Espessura dos geotêxteis
T_l	Temperatura do lodo
T_m	Temperatura do meio de transferência de calor
T_r	Temperatura absoluta da superfície radiante
uH	Unidade de Hazen para o parâmetro de cor
V	Volume
W	Massa do recipiente vazio
ψ	Permissividade hidráulica

SUMÁRIO

CÁPITULO 1

1	INTRODUÇÃO	1
---	------------------	---

CAPÍTULO 2

2	OBJETIVOS	4
2.1	OBJETIVO GERAL.....	4
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4

CAPÍTULO 3

3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1	ASPECTOS GERAIS	5
3.2	SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE CICLO COMPLETO ...	8
3.3	RESÍDUOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	9
3.4	SISTEMAS DE TRATAMENTO DE LODO	12
3.4.1	Unidades de espessamento de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA).....	13
3.4.1.1	Sedimentadores.....	13
3.4.1.2	Flotadores	14
3.4.2	Sistemas mecânicos de desaguamento de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA)	15
3.4.2.1	Filtro prensa	15
3.4.2.2	Centrífuga	15
3.4.3	Sistemas naturais de desaguamento de lodo de Estações de Tratamento de Água (ETA)	16
3.4.3.1	Generalidades	16
3.4.3.2	Lagoa de lodo	18
3.4.3.3	Leito de Secagem.....	19
3.4.3.4	Leito de Drenagem	20
3.4.3.4.1	Geotêxtils.....	20
3.4.3.4.2	Propriedades dos geotêxteis	21

3.4.3.4.3 Sistemas de tratamento de lodo que utilizam como meio filtrante o geotêxtil.....	22
--	----

CAPÍTULO 4

4 MATERIAIS E METODOS.....	27
4.1 GENERALIDADES	27
4.2 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA BOM JARDIM EM UBERLÂNDIA-MG.....	27
4.3 ENSAIOS PRELIMINARES	29
4.3.1 Amostra de lodo	29
4.3.2 Procedimentos metodológicos para caracterização do lodo.....	30
4.3.2.1 Teste para determinação do Tempo de Drenagem	30
4.3.3 Procedimentos metodológicos para a seleção dos geotêxteis	30
4.4 ENSAIOS COM O SISTEMA DE LEITO DE DRENAGEM.....	32
4.4.1 Ensaios I, II e III.....	32
4.4.1.1 Instalações experimentais dos Leitos de Drenagem	32
4.4.1.2 Procedimentos para avaliação do desempenho dos Leitos de Drenagem - Fase de drenagem	34
4.4.1.3 Procedimentos para avaliação do desempenho dos Leitos de Drenagem - Fase de secagem	35
4.4.2 Ensaio IV.....	35
4.4.2.1 Instalações experimentais dos Leitos de Drenagem	35
4.4.2.2 Procedimentos para avaliação do desempenho dos Leitos de Drenagem - Fase de drenagem	35
4.4.2.3 Procedimentos para avaliação do desempenho dos Leitos de Drenagem - Fase de secagem	36

CAPÍTULO 5

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 ENSAIOS PRELIMINARES	37
5.1.1 Caracterização do lodo	37
5.1.2 Seleção das mantas geotêxteis.....	39
5.2 ENSAIOS COM OS LEITOS DE DRENAGEM	41
5.2.1 ENSAIO I.....	41

5.2.1.1 Avaliação do desempenho dos Leitos de Drenagem - Fase de drenagem.....	42
5.2.1.1.1 Avaliação do desempenho geral da fase de drenagem	42
5.2.1.1.2 Avaliação do desempenho parcial da fase de drenagem	44
5.2.1.2 Avaliação do desempenho Leitos de Drenagem - Fase de secagem .	
.....	46
5.2.2 Ensaio II	52
5.2.2.1 Avaliação do desempenho dos Leitos de Drenagem - Fase de drenagem.....	52
5.2.2.1.1 Avaliação do desempenho geral da fase de drenagem	52
5.2.2.1.2 Avaliação do desempenho parcial da fase de drenagem	55
5.2.2.2 Avaliação do desempenho dos Leitos de Drenagem - Fase de secagem.....	57
5.2.3 Ensaio III.....	62
5.2.3.1 Avaliação do desempenho dos Leitos de Drenagem - Fase de drenagem.....	62
5.2.3.1.1 Avaliação do desempenho geral da fase de drenagem	62
5.2.3.1.2 Avaliação do desempenho parcial da fase de drenagem	65
5.2.3.2 Avaliação do desempenho dos Leitos de Drenagem - Fase de secagem.....	68
5.2.4 Comparação resultados dos ensaios I, II e III	72
5.2.4.1 Avaliação comparativa entre as mantas para uma mesma TAS – Fase de drenagem	72
5.2.4.2 Avaliação comparativa entre as TAS para uma mesma manta - Fase de drenagem	76
5.2.4.3 Avaliação comparativa entre as mantas para uma mesma TAS e entre as TAS para uma mesma manta – Fase de secagem.....	78
5.2.5 Ensaio IV.....	80
5.2.5.1 Avaliação do desempenho geral dos Leitos de Drenagem - Fase de drenagem.....	80
5.2.5.2 Avaliação do desempenho geral dos Leitos de Drenagem - Fase de secagem.....	84

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
REFERÊNCIAS.....	89
APÊNDICES	94

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Segundo Lima (1997), no final de 1970 e início dos anos 80, o Brasil apresentou um acentuado aumento da urbanização, concomitante ao processo de industrialização do país. Fatores esses que contribuíram com o aumento do consumo de bens, água e energia. Diante deste contexto aumentou também a variedade e o volume de resíduos gerados pela indústria e sociedade, os quais provocam prejuízos ao meio ambiente, quando não são corretamente dispensados na natureza. A partir de 1970 o contexto sócio econômico do país e do mundo, marcado pelo aumento do consumo e da geração de resíduos, contribuiu gradativamente com a conscientização e preocupação ambiental.

A qualidade da água doce disponível no planeta, diante dos processos de poluição e contaminação das águas superficiais e subterrâneas tem sido reduzida ao longo dos anos. O Brasil possui inúmeras fontes de água doce, no entanto, mesmo sendo a água um recurso hídrico renovável, a falta de planejamento e controle ambiental podem provocar a sua escassez (CARNEIRO et. al., 2005). Neste contexto como uma medida para a preservação e manutenção dos corpos hídricos se faz necessário o gerenciamento dos resíduos gerados pelas Estações de Tratamento de Água (ETAs) (BARROSO, 2007).

No Brasil essa conscientização e preocupação com os recursos hídricos, culminaram, a princípio, com a adoção da Política Nacional do Meio Ambiente de 1981, seguida pela criação de organismos nacionais como a Agência Nacional de Águas (ANA) e da criação e aprovação de leis como a lei 9.433 (1997), lei 13.199 (1999) e a lei 12.305 (2010) que altera a lei 9.605 (1998). No estado de Minas Gerais vigora a lei 13.199 aprovada em 29 de Janeiro de 1999, a qual afirma que o estado irá gerenciar e garantir o financiamento a programas de proteção, melhoria e recuperação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos contra a poluição. No âmbito Federal vigoram as leis: 9.433 aprovada em 8 de Janeiro de 1997, a qual exige medidas que garantam a redução do volume de resíduos gerados e a disposição correta destes no ambiente e condena a disposição do lodo sem tratamento nos cursos de água; e a lei 12.305 aprovada em 2 de agosto de 2010, a qual irá restringir a partir de 2014 a utilização dos aterros sanitários apenas para resíduos que não apresentam nenhuma forma de reutilização ou reciclagem. O lodo de ETAs, por configurar

resíduo com potencial de reutilização, não poderá ser lançado diretamente nos aterros sanitários.

A grande preocupação com os resíduos das Estações de Tratamento de Água (ETA), no Brasil, é quanto ao lançamento indiscriminado desses diretamente nos corpos de água, principalmente mananciais superficiais. O lançamento de resíduos nos mananciais superficiais favorece a redução da qualidade da água bruta e a formação de um ciclo vicioso caracterizado pelo consequente aumento do uso de produtos químicos no tratamento da água e a geração de um crescente volume de resíduos (CORDEIRO et. al., 2001). Ainda são poucas as ETAs que tem sistemas de tratamento ou de desaguamento de lodo no Brasil, aproximadamente 0,5 % das ETAs, assim como ainda são poucos os estudos sobre o manejo dos resíduos da indústria da água (BARROSO, 2007)

No Brasil, a produção de resíduos pelas ETAs representa cerca de 1 a 4 % do volume de água tratada (BARROSO, 2007). Estes resíduos são constituídos de fase sólida e fase líquida, sendo a fase líquida subdividida em frações de água livre, água do floco, água capilar e água absorvida. Dentre as frações de água é possível obter uma fração de água livre em quantidade apreciável, a qual pode ser removida do lodo de forma natural por meio de diversos sistemas naturais de desaguamento como sistemas Leitos de Drenagem (LD) ou Lagoas de Lodo. Vários estudos revelam que os Leitos de Drenagem, por serem sistemas naturais, apresentam menores custos para implantação, manutenção e operação, o que os torna mais viáveis quando comparados aos sistemas mecânicos de remoção de água (MOTT; ROMANOW, 1992).

Muitos municípios brasileiros, principalmente de pequeno porte, contam com escassos recursos financeiros para investimento no gerenciamento dos resíduos das ETAs, entretanto, apresentam disponibilidade de área e condições climáticas favoráveis, o que beneficia a aplicação do sistema LD (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2008). Esta técnica já é realidade em alguns municípios do Brasil e tem demonstrado resultados eficientes como pode ser verificado nos trabalhos desenvolvidos por Cordeiro et. al. (2001) e Fontana (2004). As principais características deste tipo de sistema em termos de eficiência é a rápida drenagem da água livre, que a torna prontamente disponível, e a eficiente redução de impurezas medidas geralmente sob o aspecto da turbidez.

Considerando-se a possibilidade de geração de até 4 % de resíduos sobre a produção bruta de água por dia, é importante a condução de estudos que procurem avaliar alternativas ao descarte destes resíduos. Neste sentido tanto o resíduo resultante da lavagem dos filtros quanto da limpeza de decantadores pode ser submetido a sistemas de desidratação

naturais como os Leitos de Drenagem. Estes sistemas constituem uma alternativa viável de ser aplicada em muitas regiões do país, em se tratando de sistemas que exigem baixos custos de implantação e manutenção, quando comparados a sistemas mecanizados, e são adequados a regiões de clima tropical, uma vez que o mecanismo de tratamento é favorecido por temperaturas mais elevadas.

Este trabalho de mestrado visa, portanto, avaliar a eficiência de tratamento de lodo da ETA Bom Jardim em Uberlândia empregando-se o sistema natural de desaguamento constituído de Leitos de Drenagem.

CAPÍTULO 2

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho das fases de drenagem e secagem do desaguamento de lodo da ETA Bom Jardim pelo sistema de Leito de Drenagem (LD).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar diversos tipos de mantas geotêxteis para comporem o sistema de LD em escala reduzida a serem utilizados no desaguamento de lodos de decantadores;
- Avaliar diferentes taxas de aplicação de sólidos nos Leitos de Drenagem, e a interferência destas nas fases de drenagem e secagem;
- Avaliar o procedimento de descarte dos primeiros volumes de água livre passantes pelo LD em função da melhora nas características do drenado;
- Comparar a influência da atuação das variáveis climáticas e da ausência parcial dessas variáveis na fase de secagem.

CAPÍTULO 3

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ASPECTOS GERAIS

Segundo a NBR 12.216 (1992) define-se Estação de Tratamento de Água (ETA) como sendo um conjunto de unidades, utilizadas para adequação da água bruta aos padrões de potabilidade estabelecidos, atualmente, pela portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde de 2011. O Brasil possui aproximadamente 7500 ETAs de abastecimento de ciclo completo, e apesar da legislação brasileira (leis 13.1999/99, 9.433/97 e 12.305/10) exigir providências das Estações de Tratamento de Água para manutenção da qualidade e preservação dos mananciais de água, a realidade e aplicação destas medidas ainda não é observada na maioria das ETAs no Brasil (CORDEIRO et. al., 2001). Percebe-se que ainda não foi desenvolvida uma consciência da posição destas ETAs na atual sociedade capitalista, visão esta observada nos EUA após a implantação da lei PL-92-500 “*Clean Water Act*”, a qual considera a ETA uma indústria, cuja matéria prima é a água. Matéria prima essa submetida a processos físico-químicos para transformação em água potável. Ao considerar a ETA como sendo uma indústria da água, assim como todos os outros tipos de indústria, esta tem seus direitos e principalmente deveres a cumprir para manutenção e preservação do meio ambiente quanto à produção e disposição final dos resíduos gerados no seu processo produtivo (BARROSO, 2007).

No contexto internacional, a partir de 1946, através da AWWA (*American Water Works Association*), começaram a surgir as primeiras publicações que refletiam a maior conscientização e preocupação quanto ao problema da poluição e possibilidade de escassez de água. Entretanto, alguns autores reportam que o problema dos resíduos de ETA, tem sido objeto de preocupações desde a década de 30, nos EUA, mas os resultados obtidos nestes trabalhos não foram formalmente publicados. Em 1980, a AWWA fomentou a discussão sobre o problema da produção de lodo pelas ETAs, em parceria com países europeus, estimulando e promovendo trabalhos para a caracterização do lodo de ETA quanto as suas macro e micropropriedades, e os possíveis impactos desse resíduo na natureza. A partir de

1990, outros países asiáticos, alguns países da América Latina e África se uniram a AWWA e começaram a investigar e avaliar sobre o potencial tóxico desse resíduo aos cursos de água, sobre as possibilidades de tratamento, sobre a disposição final adequada para o lodo e as possíveis interferências do lançamento destes nos corpos hídricos (BARROSO, 2007).

O tipo de tratamento e tecnologia aplicados à água depende do fim de consumo, podendo ser para consumo humano ou para aplicação nos diversos setores produtivos que demandam água de qualidade (CORDEIRO et. al., 2001). No Brasil, os padrões de qualidade da água para o consumo humano são estabelecidos pela Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde de 2011. Segundo as diretrizes desse regimento a água bruta se torna potável ao passar por processos que inativam microrganismos potenciais causadores de doenças, removem impurezas em suspensão e dissolvidas e controlam suas características organolépticas.

Segundo a Resolução CONAMA 357/2005 as águas superficiais podem ser classificadas como doces, salobras ou salinas (Quadro1), sendo que as águas doces representam a principal fonte de água para fins potáveis. A partir dessa classificação, as respectivas categorias podem ser subclassificadas segundo sua composição físico-química em treze categorias, sendo possível definir, a partir dessa subclassificação, o tipo de tratamento ao qual a água deve ser submetida para tornar-se adequada ao fim a que se destina. Além das dez categorias apresentadas no Quadro 2, as águas doces, salobras e salinas também apresentam as subclasses especiais, as quais são caracterizadas pela ausência de poluentes e de alterações significativas da comunidade aquática, e podem, portanto, serem consideradas puras.

Quadro 1 - Classificação das águas superficiais.

Classificação de águas superficiais	Caracterização quanto à salinidade
Doce	Igual ou inferior a 0,5‰
Salobra	Superior a 0,5 ‰ e inferior a 30 ‰
Salina	Igual ou superior a 30 ‰

Fonte: Resolução CONAMA 357/2005

Quadro 2 - Subclassificação das águas superficiais.

Classificação das águas superficiais	Subclassificação das águas superficiais segundo a Resolução CONAMA 357/2005	Caracterização quanto aos parâmetros tradicionais de qualidade da água
Doce	Classe I	Demandas Bioquímicas (DBO) a 20 °C até 3 mg.L ⁻¹ O ₂ ; Oxigênio Dissolvido (OD) superior a 6 mg.L ⁻¹ O ₂ ; turbidez até 40 UNT (unidades nefelométrica de turbidez); cor verdadeira do nível de cor natural do corpo de água em mg Pt.L ⁻¹ e pH entre 6,0 e 9,0.
	Classe II	Cor verdadeira máxima de 75 mg Pt..L ⁻¹ L; turbidez: máxima de 100 UNT; DBO a 20°C máxima de 5 mg.L ⁻¹ O ₂ ; OD, superior a 5 mg.L ⁻¹ O ₂ ; máximo de corante clorofila <i>a</i> de 30 µg.L ⁻¹ ; densidade de cianobactérias máxima de 50000 cel.mL ⁻¹ ou 5 mm ³ .L ⁻¹ ; e fósforo total máximo de 0,030 mg.L ⁻¹ para ambientes lênticos; e de 0,050 mg.L ⁻¹ , em ambientes intermediários.
	Classe III	Densidade de cianobactérias máxima de 50.000 cel.mL ⁻¹ , ou 5mm ³ .L ⁻¹ ; DBO a 20°C no máximo 10 mg.L ⁻¹ O ₂ ; OD maior que 4 mg.L ⁻¹ O ₂ ; turbidez máxima de 100 UNT; cor verdadeira no máximo 75 mg Pt.L ⁻¹ e pH entre 6,0 e 9,0.
	Classe IV	Apresenta maiores valores permitidos para parâmetros como OD superior a 2,0 mg.L ⁻¹ O ₂ e pH entre 6,0 e 9,0.
Salobra	Classe I	Taxa de carbono orgânico total máximo de 3 mg.L ⁻¹ , OD superior a 6 mg.L ⁻¹ O ₂ e pH entre 6,5 e 8,5.
	Classe II	Taxa de carbono orgânico total inferior a 5,00 mg.L ⁻¹ e OD superior a 5,0 mg.L ⁻¹ O ₂
	Classe III	Taxa de carbono orgânico total máximo de 10 mg.L ⁻¹ , OD superior a 4 mg.L ⁻¹ O ₂ e pH entre 6,5 e 8,5
Salina	Classe I	Ausência de toxicidade crônica aos organismos (de acordo com os critérios estabelecidos pelo órgão ambiental competente), taxa de carbono orgânico total: máxima de 3 mg.L ⁻¹ , OD superior a 5 mg.L ⁻¹ O ₂ e pH entre 6,5 e 8,5
	Classe II	Ausência de toxicidade aguda a organismos (de acordo com os critérios estabelecidos pelo órgão ambiental competente), taxa de carbono orgânico total Máximo de 5,00 mg.L ⁻¹ , OD superior a 4 mg.L ⁻¹ O ₂
	Classe III	pH entre 5 e 9 e OD superior a 3 mg.L ⁻¹ O ₂

Fonte: Resolução CONAMA 357/2005

As águas doces de mananciais superficiais podem ser classificadas quanto à qualidade (composição físico-química) em cinco classes, dentre elas a classe especial, que pode ser utilizada para o consumo humano com a exigência exclusiva de desinfecção da mesma e a preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas. As águas doces pertencentes à classe I podem ser utilizadas para o abastecimento e consumo humano, após tratamento simplificado. As águas da classe II podem ser utilizadas para o abastecimento e consumo humano, após tratamento convencional. As águas da classe III podem ser utilizadas para o abastecimento e consumo humano, após tratamento avançado, enquanto as águas da classe IV podem ser utilizadas exclusivamente para a navegação e harmonia paisagística.

Para o uso potável da água podem ser utilizados como mananciais os corpos hídricos classificados como classe especial, classe I, classe II e classe III empregando-se tecnologias existentes como o tratamento do tipo ciclo completo que consiste, basicamente, nas etapas de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção. O subproduto deste processo é objeto de estudo deste trabalho. O resíduo avaliado neste trabalho foi produzido na ETA Bom Jardim, localizada no município de Uberlândia - MG.

3.2 SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE CICLO COMPLETO

A porcentagem de água doce no planeta é significativamente baixa quando comparada à quantidade de água salobra e salina, no entanto, são mais utilizados e aplicados os sistemas para tratar as águas doces, que dispensam a etapa de dessalinização da água, etapa essa que torna o tratamento mais dispendioso financeiramente. Quando comparado aos processos existentes na atualidade para a produção de água potável a partir de águas salobras ou salinas, o tratamento das águas doces exige um menor custo de implantação e manutenção.

Segundo a Resolução CONAMA 357/2005 o sistema de Tratamento de Água de ciclo completo ou convencional é adequado para o tratamento de águas de mananciais classificados como classe II, visto que quanto maiores os índices de contaminantes e poluição da água, maiores são as exigências para o tratamento destas. No entanto as águas classificadas como doce classe III também podem ser submetidas ao tratamento pelo sistema de ciclo completo desde que a água tratada atenda aos parâmetros de potabilidade estabelecidos pela portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde de 2011.

O órgão estadual responsável pela fiscalização das ETAs da região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba é a Superintendência Regional de Regularização Ambiental do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (SUPRAM), a qual estabelece as normas e os procedimentos adequados ao tratamento das diferentes classes de água.

Segundo o IBGE/PNSB (2010), 69,2 % da água tratada e distribuída na rede geral no Brasil são originadas de ETAs de ciclo completo. O sistema de distribuição geral desconsidera formas alternativas de abastecimento das populações como água proveniente de chafarizes, bicas, minas, poços particulares, carros-pipas, cisternas e outros. Para o uso potável da água, independentemente da classificação do manancial de captação, se faz necessário que esta apresente, após tratamento adequado, parâmetros como oxigênio

dissolvido (OD), densidade de cianobactérias, turbidez, cor, pH, sólidos suspensos e dissolvidos em acordo com o estabelecido pela Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde de 2011.

Na etapa de coagulação ocorre o processo de aglutinação das partículas sólidas, para que as mesmas possam se sedimentar rapidamente. Esta etapa é realizada na unidade de mistura rápida e o procedimento é caracterizado pela dispersão de sais de alumínio ou ferro, denominados de coagulantes, na água a ser tratada. A coagulação é seguida pela floculação, na qual há agitação lenta da água coagulada para a formação dos flocos, por meio da ação dos coagulantes. A mistura lenta é suficiente para promover o contato entre os coágulos menores, sem ser demasiadamente alto para evitar a fragmentação dos flocos (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

A etapa de decantação é caracterizada pelo processo de sedimentação, o qual representa a separação, pela ação da gravidade, da água de abastecimento dos flocos de sedimentos formados na etapa de floculação, (DI BERARDO; DANTAS, 2005). Em todo o processo de tratamento de água, a decantação é a etapa que apresenta o acúmulo de maiores volumes de lodo.

Nos Filtros é realizada a etapa de filtração, onde há a remoção dos pequenos flocos, sedimentos e partículas suspensas que não foram retidos no processo de decantação. Logo após a etapa de filtração a água é submetida à etapa de desinfecção, na qual ocorre além da desinfecção a fluoração e a correção de pH (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). O tratamento de água do tipo ciclo completo tem variáveis como os tipos de reagentes químicos usados, a tecnologia empregada e a ordem e disposição das etapas de tratamento. São vários os reagentes disponíveis no mercado, com suas vantagens e desvantagens, as quais devem ser adequadas às características da água do manancial a ser tratada. A tecnologia a ser utilizada varia de acordo com a disponibilidade financeira para a implantação e manutenção da estação (FONTANA, 2004).

3.3 RESÍDUOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Segundo a NBR 10.004 (2004) o lodo de ETA é classificado como resíduo sólido, no entanto apresentam aproximadamente 95 % de água em sua constituição, água esta que exige tratamento adequado para ser separada da parte sólida de forma a proporcionar redução

dos custos de transporte do lodo e redução também dos danos ambientais. Os resíduos de ETA são constituídos basicamente por água, areia, silte, argila e alguns metais, reagentes químicos dissolvidos oriundos principalmente do próprio processo de tratamento da água como sais de alumínio ou de ferro e matéria orgânica como os aglomerados de bactérias (CORDEIRO, 1993). Segundo Babatunde e Zhao (2006) o lodo de ETA apresenta parâmetros com valores próximos aos descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores dos parâmetros de qualificação da água (media +/- desvio padrão)

Parâmetro	Unidade	Lodo formado em ETA que utiliza coagulante a base de alumínio	Lodo formado em ETA que utiliza coagulante a base de ferro
Alumino	% *	29,7 +/- 13,3	10,0 +/- 4,8
Ferro	% *	10,2 +/- 12	26,0 +/- 15,5
pH	-	7,0 +/- 1,4	8,0 +/- 1,6
DBO	mg.L ⁻¹	45 (2 – 104)	A.D.
Chumbo	mg.Kg ⁻¹	44,1 +/- 38,2	19,3 +/- 25,3
Cádmio	mg.Kg ⁻¹	0,5	0,48 +/- 0,26
Cromo	mg.Kg ⁻¹	25,0 +/- 20,1	25,7 +/- 21,6
Sólidos Totais	mg.L ⁻¹	(2500 – 52345)	(2132 – 5074)

*Porcentagem do componente na amostra de lodo seca.

A.D. significa ausência de dados.

Fonte:Adaptado de Babatunde e Zhao(2006)

A constituição do lodo é variável de acordo com as características próprias da água, com o sistema utilizado para o tratamento e com as diferentes etapas e procedimentos de tratamento a partir dos quais o resíduo é formado e essas diferenças conferem variações no lodo.

Para uma boa caracterização dos resíduos de ETAs se faz necessário a análise de suas micro e macropropriedades. Segundo Barroso (2007), as micropropriedades do lodo definem suas características intrínsecas e podem ser avaliadas como características de suspensão, enquanto que as macropropriedades estão relacionadas às características que conferem a tratabilidade dos resíduos e são dependentes das micropropriedades. Segundo o autor as micro e macropropriedades do lodo são importantes para a tomada de decisões quanto à escolha do processo de remoção de água e aproveitamento dos resíduos de ETAs. Além disso, alerta que as propriedades importantes para estudos de remoção de água por sistemas naturais podem diferir, enormemente, daquelas usadas em estudos por sistemas mecânicos de remoção considerando-se ainda as diferenças substanciais entre as diversas tecnologias de tratamento que compõem os sistemas mecânicos e naturais de desaguamento.

As principais micropropriedades utilizadas para caracterização de lodos de ETAs são temperatura, pH, turbidez, cor , Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda

Bioquímica de Oxigênio (DBO), concentração de sólidos e composição química (metais pesados como Al, Fe, Pb, Cr, Cd e Mg) (COFIEet. al., 2006). O Quadro 3 mostra a definição e a importância destas micropropriedades do lodos de ETAs.

Quadro 3 - Definição e importância das micropropriedades de lodos de ETAs.

Micropropriedades	Definição do parâmetro e importância destes para a determinação da qualidade da água
Temperatura	Importantes para o cálculo de outros parâmetros de qualidade da água como alcalinidade, salinidade e estudos sobre a influência do carbonato de cálcio na saturação e estabilidade da água.
pH	Expressa a concentração dos íons hidrogênio, é adimensional e tem o valor calculado pelo logaritmo decimal negativo da atividade ou concentração dos íons de hidrogênio (H^+).
Turbidez	Caracterizada pela presença de suspensão coloidal composta por moléculas orgânicas e/ou inorgânicas, plâncton e organismos microscópicos. Este parâmetro é calculado pela diferença entre a luz emitida e captada por um sensor após esta atravessar o meio composto por água ou lodo, esta variação óptica da intensidade da luz se deve a dispersão e absorção de luz pelo material suspenso na água ou lodo.
Cor	Cor de uma amostra de água é o grau de redução de intensidade que a luz sofre ao atravessá-la, devido à presença de sólidos dissolvidos, tais como: ácidos húmicos, fulvinos, manganês e ferro. Ácidos húmicos intensificam a coloração amarelo amarronzada, o que também pode ser intensificado pela presença de ferro em cristais solúveis. Cor verdadeira desconsidera sólidos suspensos e coloides, o que não acontece com a cor aparente.
Demandra Bioquímica de Oxigênio (DBO)	Teste que afere a quantidade de oxigênio molecular utilizado durante um período determinado de incubação para a degradação bioquímica de matéria orgânica. Afere também a quantidade de oxigênio necessário para a oxidação de matérias orgânicas como sulfetos e ferro ferroso.
Demandra Química de Oxigênio (DQO)	Representa a quantidade de oxigênio necessário para estabilizar quimicamente a matéria orgânica e inorgânica de um despejo, ou seja, representa o consumo de oxigênio pela oxidação química da matéria orgânica e inorgânica. É uma indicação indireta do teor de carbono orgânico através do consumo de oxigênio no processo de oxidação da matéria orgânica presente na água.
Concentração de sólidos	A classificação dos sólidos pode ser química ou física. Fisicamente eles são classificados segundo suas dimensões: sólidos dissolvidos possuem dimensões inferiores a 2,0 μm , e em suspensão tem dimensões superiores a 2,0 μm . Segundo a NBR 10664 (1989): Do ponto de vista químico, os sólidos são classificados como voláteis e fixos. Sólidos voláteis são os que se volatilizam a temperaturas inferiores a 550 °C, sejam estes substâncias orgânicas ou sais minerais que evaporam a esta temperatura. Os sólidos fixos são aqueles que permanecem após a completa evaporação da água, geralmente os sais.

Fonte: APHA et. al. 2005.

As macropropriedades, como dito, são dependentes das micropropriedades e também interferem no processo de desidratação do lodo. Um exemplo de macropropriedade é a resistência específica à filtração (DHARMAPPA, 1997 *apud* BARROSO, 2007). Segundo APHA (2005) o conceito de Resistência Específica à filtração e de Tempo de filtragem são semelhantes, no entanto existem testes diferentes para a determinação de ambas as macropropriedades.

A Resistência Específica à filtração é a força ou resistência específica que se opõe ao desaguamento. Esta é representada pela razão entre a unidade de massa seca e a unidade de área ocupada pelo lodo. Segundo Mortara (2011), esta macropropriedade pode ser estimada pela distribuição e tamanho dos flocos do lodo (APHA, 2005).

3.4 SISTEMAS DE TRATAMENTO DE LODO

Nas ETAs assim como em toda indústria, no processo industrial de transformação da matéria prima, há geração de resíduos. No caso das ETAs há a formação de resíduos principalmente nos decantadores, nos filtros e na casa de química (CORDEIRO et. al., 2001). Porém, somente nos últimos anos o tratamento e a disposição dos resíduos da indústria da água têm recebido a devida atenção, notadamente com a criação das leis 13.199 (1999), 9.433 (1997) e 12.305 (2010) que exigem dos gestores dos sistemas de abastecimento de água medidas que garantam a redução do volume de resíduos gerados e a disposição correta destes no ambiente, condenando a disposição do lodo sem tratamento nos cursos de água, e a partir de 2014, até mesmo nos aterros sanitários.

Com a maior preocupação e conscientização quanto ao volume e disposição final do lodo começaram a surgir trabalhos que propõe medidas para tratamento do lodo de ETA. Dentre as propostas surgiram as unidades de espessamento do lodo como os Sedimentadores (espessamento por gravidade) e os Flotadores (flotação por ar dissolvido), sendo o último uma proposta mais recente. Outras possibilidades são os sistemas mecânicos e os naturais de desaguamento. Como exemplo de sistema mecânico é possível destacar, quanto a maior aplicação no contexto de desidratação do lodo, o filtro prensa e a centrífuga. E como exemplos de sistemas naturais Lagoa de lodo, Leito de Secagem (LS) e o mais recente Leito de Drenagem (LD).

No entanto é importante destacar que além da grande variedade de sistemas disponíveis para o tratamento de lodo de ETA, os mesmos também podem ser utilizados para o tratamento de efluentes domésticos (ETE) e industriais, sendo variável de acordo com o resíduo, a eficiência e o desempenho dos sistemas. Destaca-se que em função da origem do resíduo e considerando-se os diferentes processos de formação, os lodos de ETA e de ETE apresentam propriedades diferentes que influenciam no seu tratamento (MORTARA, 2011). Ressalta-se também que para implantação de quaisquer dos modelos propostos na literatura

devem ser considerados variáveis como espaço territorial, disponibilidade financeira, clima e outras variáveis dependentes das características e exigências do lodo, as quais devem ser avaliadas em escala laboratorial antes da implantação (FONTANA, 2004; ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2008).

3.4.1 Unidades de espessamento de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA)

3.4.1.1 Sedimentadores

Os sedimentadores são unidades de tratamento de lodo cujo regime de alimentação pode ser realizado por batelada ou de forma contínua. A aplicação deste sistema pode ser baseada em sistemas implantados em condições semelhantes ou a partir de avaliações prévias em escala laboratorial ou piloto, para que o sistema opere de forma adequada e eficiente. Experiências em situações semelhantes ou mesmos o estudo em escala reduzida, permitem a determinação de alguns parâmetros indispensáveis para o ideal desempenho do sistema de espessamento, dentre os quais podemos destacar a taxa hidráulica de aplicação superficial e a taxa de aplicação (ou descarga) de sólidos (REALI, 1999; FONTANA, 2004). A taxa hidráulica de aplicação superficial representa o limite superior de vazão de lodo por unidade de área útil do sedimentador em planta e a taxa de aplicação (ou descarga) de sólidos é definida pelo fluxo de sólidos aplicados por unidade de área útil do sedimentador em planta. Ambos os parâmetros quando corretamente ajustados garantem um apropriado grau de clareamento e adensamento do lodo.

Fontana (2004) destaca que para a utilização de sedimentadores no tratamento de resíduos gerados em ETAs que utilizam coagulantes a base de ferro e alumínio é necessário o condicionamento químico do lodo através de dosagens adequadas de polímeros sintéticos, para a obtenção de um melhor desempenho do sistema de clareamento e adensamento pela ação da gravidade.

3.4.1.2 Flotadores

Os flotadores são unidades de tratamento nas quais as partículas presentes no líquido a ser tratado se acumulam na superfície da unidade onde são removidas geralmente por raspadores mecanizados de superfície, ao contrário da sedimentação na qual as partículas se acumulam na base.

Segundo Oliveira (2007) são várias as modalidades de flotação, no entanto a flotação por dissolvido (FAD) é a técnica mais utilizada na área de saneamento, com eficiência comprovada no tratamento de água de abastecimento, em especial quando se trata de água de reservatório eutrofizado, no espessamento de lodo, no tratamento de efluentes, principalmente secundários, com vários trabalhos publicados que corroboram com sua aplicação. Nas unidades de tratamento por flotação por ar dissolvido ocorrem os processos de coagulação e floculação, nos quais as partículas presentes no líquido são desestabilizadas e há formação dos flocos, e flotação, responsável pela remoção dos flocos formados devido à ascensão das partículas formadas nos processos anteriores em função da aglutinação de micro-bolhas de ar.

O espessamento de lodo de ETA por flotação por ar dissolvido apresenta algumas vantagens em relação ao espessamento por gravidade como relata Reali (1991):apresentam maiores taxas de aplicação de sólidos e de clarificação conduzindo a unidades mais compactas, apresentam lodo espessado com maior porcentagem de sólidos e apresentam maior versatilidade operacional. Conforme Reali (1991) os parâmetros de projeto destas unidades como espessadores são: taxa hidráulica de aplicação superficial (TAS) e taxa de aplicação (ou de carga) de sólidos (TCS) (parâmetros também utilizados para dimensionamento de sedimentadores), relação entre o fluxo máximo de ar dissolvido fornecido para flotação e o fluxo máximo de sólidos suspensos totais (SST) afluente ao flotador (A/S).

3.4.2 Sistemas mecânicos de desaguamento de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA)

3.4.2.1 Filtro prensa

Criado para o uso industrial, o Filtro Prensa foi adaptado para sua utilização na remoção de água de resíduos como o lodo. O processo de desidratação neste sistema consiste na disposição do lodo sobre um material filtrante, onde este é submetido à pressão diferenciada, em seguida a água do lodo é filtrada e os sólidos são retidos sobre o material filtrante no interior da câmara. O lodo retido no meio filtrante apresenta elevado teor de sólidos e é denominado de torta (lodo seco) (REALI, 1999). Apesar dos bons resultados obtidos em termos de concentração de sólidos no produto final é importante a ponderação de seu uso, pois em se tratando de um sistema mecânico de desidratação do lodo existem desvantagens que devem ser consideradas como o elevado custo de implantação e manutenção do sistema (elevado consumo de energia elétrica) (FONTANA, 2004).

Para o melhor desempenho do sistema do tipo filtro prensa devem ser considerados fatores importantes como a definição do material filtrante e aplicação de produtos químicos. O material filtrante exerce influência sobre a eficiência da operação considerando-se principalmente o tamanho das partículas que se deseja remover. A adição correta de produtos químicos (mistura, pH e dosagem) auxilia na formação de flocos mais compactos e mais fáceis de serem retidos no processo de filtração (REALI, 1999).

3.4.2.2 Centrífuga

Este tipo de sistema é utilizado para a separação das fases sólida e líquida no desaguamento de lodo desde 1960, quando ainda haviam poucos relatos de estudos sobre o tema com apenas dois trabalhos relacionados à aplicação de centrífuga no desaguamento de lodo de ETAs, nos EUA. Este sistema tem como princípio básico para a separação das fases líquida e sólida a ação da força centrífuga originada com a rotação do recipiente contendo o lodo. Este mecanismo de ação é semelhante ao processo de sedimentação pela ação da gravidade, contudo a força gravitacional é bem superior (FONTANA, 2004).

Para a desidratação de lodo de ETA e de ETE se faz necessário a utilização de modelos de centrífugas que tem tambores cilíndricos com paredes não perfuradas, os quais são ideais para o desaguamento de lodo, visto que permitem a compactação do lodo na parte interna do tambor. Há trabalhos que relatam que o condicionamento do lodo com produtos químicos associados ao pré-tratamento em sistemas sedimentadores, como sedimentadores por gravidade ou flotadores por ar dissolvido, melhoram o desempenho e a eficiência do processo de desidratação do lodo, alcançando valores de teor de sólidos de até 60% (REALI, 1999).

3.4.3 Sistemas naturais de desaguamento de lodo de Estações de Tratamento de Água (ETA)

3.4.3.1 Generalidades

São considerados sistemas naturais de desaguamento de lodo as Lagoas de lodo, Leitos de Secagem e mais recentemente os Leitos de Drenagem. O sistema de lagoas de lodo é principalmente indicado quando há disponibilidade de área a baixo custo. A remoção de água para redução do volume dos resíduos pode ocorrer em três fases: retirada da água sobrenadante, evaporação e transpiração. O tempo para desaguamento dos resíduos pode variar bastante, inclusive meses, em função principalmente das condições climáticas e operacionais. O método de Leitos de Secagem tem sido utilizado desde o início do século XX (1900) e a partir de então, vem sendo aplicada praticamente sem mudanças consideráveis em sua estrutura física. Dentre as melhorias ocorridas nesse sistema, pode ser citada a criação do Leito de Drenagem (LD) (CORDEIRO et. al., 2001). No LD, o tempo de remoção de água constituiu-se da somatória do tempo de drenagem (fase de drenagem) e de evaporação da água (fase de secagem). Após a drenagem da água livre, a secagem da massa de lodo ocorre por meio da evaporação, e as variáveis climáticas, tais como, umidade relativa do ar, ventilação, temperatura, radiação solar e orvalho são de grande importância para o melhor desempenho de desaguamento. Como a evaporação, a condução, a convecção e a radiação são processos que interferem diretamente na eficiência destes sistemas os aspectos relativos estes mecanismos serão sinteticamente discriminados.

A evaporação é resultado do processo de transferência de calor (altas temperaturas e radiação solar) do ambiente para o lodo. Segundo David (2002) os processos de transferência de calor dependem das variáveis climáticas: temperatura, umidade relativa do ar, velocidade dos ventos, área da superfície de exposição do lodo e das micro e macropropriedades do lodo. Os métodos para a transferência de calor são: condução, convecção e radiação.

A Condução é um mecanismo de transferência de calor, que acontece a nível molecular em gases, líquidos ou sólidos. Esse consiste na transferência, por contato, da energia de partículas mais energéticas para outras partículas contíguas menos energéticas. Essa transferência ocorre no sentido do gradiente negativo (altas temperaturas para as baixas temperaturas). O cálculo do valor de transferência de calor pelo método de condução pode ser feito conforme a Equação 3.1 Onde Q_{CD} representa o calor transferido por condução, h_{CD} o coeficiente de transferência de calor por condução, A a área da superfície de transferência do calor, T_m a temperatura do meio de transferência de calor e T_l a temperatura do lodo(DAVID, 2002).

$$Q_{CD} = h_{CD} \cdot A \cdot (T_m - T_l) \quad (3.1)$$

A convecção é o processo de transporte de energia pela ação combinada da condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura. A convecção é importante principalmente como mecanismo de transferência de energia entre uma superfície sólida e um líquido ou gás (KREITH, 1977 *apud* BARROSA, 2004). Em materiais fluídios há movimentação das partículas, as quais são aquecidas pelo contato com o material sólido e tendem a se moverem direção à região com partículas com temperaturas inferiores. O valor de calor transferido pelo método de convecção pode ser calculado pela Equação 3.2. Onde Q_{CV} representa o calor transferido por convecção, h_{CV} o coeficiente de transferência de calor por convecção, A a área exposta ao meio de secagem (ar atmosférico), T_m a temperatura do meio e T_l a temperatura do lodo (BARROSA, 2004).

$$Q_{CV} = h_{CV} \cdot A \cdot (T_m - T_l) \quad (3.2)$$

A Radiação é processo de emissão e propagação de ondas eletromagnéticas por qualquer corpo com uma temperatura superior a 0 k. A transferência de calor por radiação térmica ocorre através de sólidos, líquidos e gases e no vácuo. O cálculo do valor de calor

transferido por radiação pode ser realizado conforme Equação 3.3, onde C_e representa a emissividade da superfície aquecida, S_t a constante de Stefan-Boltzman, A a área exposta a fonte radiante, T_r a temperatura absoluta da superfície radiante (envolve o lodo) e T_l a temperatura absoluta do lodo (BARROSA, 2004).

$$Q_{RD} = C_e \cdot S_t \cdot A \cdot (T_r^4 - T_l^4) \quad (3.3)$$

3.4.3.2 Lagoa de lodo

As lagoas de lodo removem a água do resíduo de ETA em três etapas principais: drenagem, evaporação e transpiração, com destaque para a etapa de evaporação que é o principal fator para o desaguamento do lodo. Por isso para a implantação deste sistema de desidratação do lodo devem ser levados em consideração alguns aspectos como clima, permeabilidade do subsolo (deve variar entre $4,2 \cdot 10^{-4}$ e $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ cm.s}^{-1}$), características do lodo, profundidade da lagoa e área superficial (as últimas dependem das características do lodo e do clima). Quanto ao clima devem ser considerados os índices pluviométricos e distribuição anual e sazonal, temperaturas extremas e taxa de evaporação. O fundo da lagoa deve ter a distância de 50 cm do nível de água do lençol freático ou seguir as recomendações legislativas locais (REALI, 1999).

São muitas as desvantagens para aplicação do sistema de Lagoa de Lodo para o tratamento dos resíduos, dentre estas a disponibilidade de área, uma vez que para a implantação deste tipo de sistema são requeridas áreas de duas a três vezes maiores que o necessário para a implantação de um Leito de Secagem, considerando-se o mesmo desempenho final. Além disso, a manutenção das Lagoas de Lodo exige maiores cuidados, como utilização de cerca de proteção para evitar eventos danosos, probabilidade de proliferação de insetos e ocorrência de maus odores e ainda possibilidade de um menor tempo de funcionamento devido à possível contaminação do solo (REALI, 1999; ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2008).

3.4.3.3 Leito de Secagem

A tecnologia dos leitos de secagem tem sido utilizada para remoção de água de rejeitos de diversos tipos de tratamento de águas residuárias e de abastecimento desde o inicio do século XX, e, a partir de então, vem sendo aplicada praticamente sem mudança considerável em sua estrutura física (CORDEIRO *et. al.*, 2001; BARROSO, 2007).

Os leitos de secagem, principalmente em relação às taxas de aplicação de sólidos, apresentam desempenho bem superior às lagoas de lodo, o que em linhas gerais significa que o dimensionamento deste sistema resulta em unidades bem mais compactas. (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2008; WOOD *et. al.*, 2007).

Estes sistemas de desaguamento natural são tanques com profundidade rasa, compostos por três camadas sendo: camada suporte, meio filtrante e sistema drenante (UGGETTI *et. al.*, 2009). Quando submetido a este sistema de tratamento, o lodo fica sujeito às variáveis físicas, evaporação e drenagem, as quais são determinantes no desempenho da unidade de tratamento. Esta tecnologia é bem dependente das variáveis climáticas, visto que em regiões com climas mais quentes apresentam um melhor desempenho de drenagem e secagem do lodo (UGGETTI *et. al.*, 2009), no entanto, vem sendo utilizado com sucesso, por exemplo, na Dinamarca desde 1998 apesar do clima pouco favorável (NIELSEN; WILLOUGHBY, 2005).

Gholikandi, Moradhasseli e Riahi (2009) relatam sobre a possibilidade de utilização de sistemas de Leito de Secagem em países de clima frio e que apresentam verões quentes. Apesar da queda da eficiência do tratamento nos períodos mais frios a grande variação de temperatura no verão oferece bons resultados para o tratamento de lodo utilizando Leitos de Secagem com raízes de plantas como *Scirpus sp*, *Typha sp.* e *Phragmites sp.* No entanto, as pesquisas sobre a interferência da vegetação na eficiência deste sistema ainda são incipientes. Nassar, Mciwem e Afifi (2006), utilizando sistema semelhante, também observaram melhores resultados para os sistemas de Leitos de Secagem com raízes destas plantas, quando comparados aos resultados obtidos na operação de sistemas tradicionais. Além disso, Uggetti et. al. (2009) observaram que o sistema de Leito de Secagem com raízes de plantas comuns possibilitou que lodo já drenado se tornasse estável e mineralizado ao longo do tempo o que pode possibilitar sua reutilização na agricultura.

Alguns trabalhos, não conclusivos, demonstram que algumas adaptações ao sistema tradicional de Leito de Secagem como estufas plásticas (cobertura plástica) (VAN

HANDEL, 1994 *apud* CORDEIRO et. al., 2001), injeção de calor (PIERRE, 1995 *apud* CORDEIRO et. al., 2001), revolvimento do resíduo para a circulação de ar e aquecimento, são favoráveis à etapa de secagem do lodo. Outra prática, utilizada em países como Japão, Estados Unidos, Itália e Israel é a solarização que difere do sistema com emprego de estufa plástica, principalmente, pelo tipo de material plástico utilizado que deve ser transparente e fino. Estas características garantem a elevação da temperatura do resíduo e possibilitam o controle ou redução da proliferação de bactérias patogênicas viabilizando o reuso deste resíduo na agricultura (CORDEIRO et. al., 2001).

Thériault, em 1991, propôs um modelo modificado de Leito de Secagem que utilizava mantas geotêxteis em substituição à camada filtrante, modelo este denominado, por Cordeiro (1993), de Leito de Drenagem (LD). Nesta nova proposta foi observada uma redução significativa do tempo de drenagem, o que representou uma evolução do método exigindo uma denominação compatível, ou seja, como a alteração do leito proporcionou otimização do tempo de drenagem, o mesmo passou a ser chamado de Leito de Drenagem (CORDEIRO et. al., 2001).

3.4.3.4 Leito de Drenagem

Como supracitado, a inovação decorrente da substituição da camada filtrante dos Leitos de Secagem convencionais por mantas geotêxteis, deu origem às unidades hoje denominadas Leito de Drenagem. Como constituem o principal agente de tratamento do lodo neste sistema será dada uma atenção especial às suas propriedades.

3.4.3.4.1 Geotêxtil

Há variações quanto ao material (polipropileno e poliéster) e processo de produção dos geotêxteis, como tecidos e não tecidos. Para o desenvolvimento deste trabalho foram avaliados geotêxteis do tipo não tecido agulhado. Segundo a NBR 12.553 (1991) este tipo de geotêxtil é um material composto por fibras mecanicamente entrelaçadas e distribuídas aleatoriamente.

De maneira geral, e conforme a NBR 12.553 (1991) este material pode ser utilizado em diferentes aplicações em obras civis e ambientais, como:

- Filtração: retenção de partículas, permitindo a passagem de fluídos;
- Drenagem: condução de fluído através do geotêxtil;
- Reforço: utiliza propriedades mecânicas para aperfeiçoamento do comportamento mecânico do solo;
- Separação: impede a mistura de dois materiais ou solo de natureza distinta.

Segundo Cordeiro (2001) a substituição da camada filtrante nos Leitos de Secagem por membranas geotêxteis apresenta muitas vantagens como possibilidade de maior controle sobre a colmatação dos poros e maiores vazões de drenado o que consequentemente contribui com redução do tempo de drenagem.

Em 1970 surgiram os primeiros trabalhos para a caracterização e avaliação da capacidade filtrante das mantas geotêxteis. Os primeiros estudos avaliavam a interferência do diâmetro dos poros dos geotêxteis nas suas respectivas capacidades filtrantes e a eficiência destas mantas associadas ou não a diferentes tipos de solos na filtração e na vida útil do material sintético. O processo de filtração provoca a retenção de resíduos (partículas maiores) nos poros do material, denominado de colmatação a qual pode inviabilizar a reutilização do geotêxtil, o que não seria financeiramente viável para ser aplicado no sistema. Nestes trabalhos com o objetivo de caracterização e avaliação da capacidade filtrante das membranas geotêxteis estudadas, foram conduzidos testes de proporção de gradiente (WILLIAMS, 1989; PALMEIRA; FANIN; VAID, 1996), testes de proporção de condutividade hidráulica (WILLIAMS, 1989) e testes de filtragem de fração fina, dentre outros. (SANSONE; KOERNER R., 1992).

3.4.3.4.2 Propriedades dos geotêxteis

Para o estudo do geotêxtil como meio filtrante é necessário compreender as propriedades hidráulicas do material. Propriedades essas como a permeabilidade normal (condutividade hidráulica), abertura de filtração e fluxo de água.

Segundo Vidal [199-] condutividade hidráulica (representada por K) de um material poroso, quando este é submetido a um fluxo laminar, é definida pela lei de Darcy (Equação 3.4). Na equação são utilizadas as variáveis vazão (Q em $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a área (A em cm^2), o comprimento (C em cm) e a resistência ao fluxo laminar (ΔH).

$$k = \frac{Q \cdot C}{A \cdot \Delta H} \quad (3.4)$$

O conceito de permissividade hidráulica considera os valores da espessura dos geotêxteis (representado por T_g , unidade cm) e os valores da condutividade hidráulica (K), pois representa a relação da condutividade hidráulica de um material e sua espessura nominal. Essa relação permite avaliar a facilidade com que o fluído atravessa o geotêxtil (Equação 3.5).

$$\psi = \frac{K}{T_g} \quad (3.5)$$

Abertura de filtração refere-se ao valor do diâmetro da maior partícula que passa pelos poros do geotêxtil. O₉₅ representa poros com o diâmetro maior que 95 % das partículas que atravessaram o geotêxtil (MORTARA, 2011).

O fluxo de água é a propriedade hidráulica que representa o volume de drenado que passa pelo geotêxtil, a qual é determinada por ensaio padronizado pela ABNT. O comportamento do geotêxtil não será o mesmo para a drenagem de um material particulado como o lodo (MORTARA, 2011).

3.4.3.4.3 Sistemas de tratamento de lodo que utilizam como meio filtrante o geotêxtil

A areia é utilizada como meio filtrante para o desaguamento de lodo em sistemas naturais de desaguamento, denominados de Leito de Secagem, desde a década de 90 (1990). Concomitante ao crescimento dos estudos e utilização do sistema de Leito de Secagem, Martel (1989) realizou um estudo para avaliação do desempenho do desaguamento de lodo congelado, pelo sistema natural de desaguamento montado em uma coluna de acrílico composta por camadas de cascalho e manta geotêxtil associada a areia. Martel (1989) avaliou a interferência do congelamento e descongelamento do lodo no seu desaguamento. O autor destaca que para a implantação deste método é necessário considerar o clima da região de implantação. O congelamento do lodo, assim como nos *icebergs* o provoca a separação da parte líquida e da parte sólida contida na água congelada, permitindo a purificação da água, no entanto o descongelamento forçado da mesma prejudica o processo de separação ou purificação da água. Apesar de utilizar a manta geotêxtil associada à areia como meio filtrante, o autor não relata a eficiência e desempenho diferenciado na associação do geotêxtil

com a areia e conclui que os resultados observados não foram conclusivos, o que reforça a necessidade de mais estudos para a utilização deste método no sistema de desaguamento do lodo.

Sistema mais utilizado desde então, o Leito de Secagem não apresentou alterações significativas estruturais e de eficiência com respeito ao tempo necessário para a drenagem da água até 1991, quando Thériault propôs um sistema de Leito de Secagem modificado, em que a areia utilizada como meio filtrante seria substituída pelo geotêxtil. Os resultados do seu trabalho demonstraram a eficiência deste material geotêxtil para o desaguamento de lodo de esgoto doméstico. Thériault (1991) observou um menor tempo para a drenagem de água do lodo, reforçou as vantagens e benefícios do sistema natural de desaguamento destacando os baixos custos para implantação e a necessidade de uma área considerada pequena para implantação do sistema. Logo, o autor também destaca que são necessários mais estudos e que a avaliação do sistema de desaguamento deve ser prolongada (mais de 24 h) para avaliação não somente da etapa de drenagem, mas também da fase de secagem do lodo.

Em 1992, Koerner G. e Koerner R. avaliaram a eficiência de geotêxteis com diferentes características físicas (como material tecido ou não e material de poliéster ou polipropileno) para a filtração de lodo de esgoto doméstico. Neste trabalho os resíduos de águas residuárias tinham diferentes origens de tratamento (aeróbico, anaeróbico e outros) e todos eram submetidos a sistemas de desaguamento desenvolvidos em colunas compostas por camadas de areia e geotêxtil ou somente areia ou somente geotêxtil. Com este trabalho o autor comparou a permeabilidade do lodo nas diferentes composições de coluna e a capacidade de retenção de sólidos nos diversos meios filtrantes (facilidade de obstrução dos poros do meio filtrante). Com isso Koerner G. e Koerner R. (1992) constataram que a permeabilidade é maior para o uso exclusivo do geotêxtil como meio filtrante quando comparado ao geotêxtil combinado com a areia.

Em 2001, Cordeiro reforça os resultados encontrados por Thériault (1991) e Koerner G. e Koerner R. (1992) após comparar o desempenho e a eficiência do tratamento pelos sistemas naturais de desaguamento de Leito de Secagem, e dos Leitos de Secagem modificados, pois, substituem o meio filtrante areia pelo geotêxtil, o que Cordeiro denomina de Leito de Drenagem. Em seus estudos Cordeiro et. al. (2001) considera o tempo total para remoção da água do lodo como sendo a soma do tempo de drenagem da água com o tempo necessário para a evaporação (secagem) da água do lodo. E a avaliação do tempo total de drenagem confirmou que como resultado da substituição da areia pelo geotêxtil houve uma intensa e rápida redução do tempo de drenagem no sistema de Leito de Secagem modificado

denominado pelo autor de Leito de Drenagem (LD), em função do desempenho alcançado pelo sistema que utiliza o geotêxtil (CORDEIRO et. al., 2001).

A utilização do geotêxtil como meio filtrante foi também avaliada em sistemas mecânicos de desaguamento de lodo por Aydilek e Edil, em 2002. Este trabalho avaliou a permeabilidade, relação de gradiente e a abertura dos poros. Foi realizada uma avaliação comparativa, cujas amostras utilizadas foram lodo industrial contaminado com bifenilpoliclorado (organoclorado) e uma amostra composta pela mistura de água com areia. Estas amostras foram submetidas ao desaguamento mecânico por filtro prensa, sendo o meio filtrante o geotêxtil. Os resultados obtidos mostraram que apesar das partículas de areia serem de tamanho semelhante as do lodo, a presença de matéria orgânica no lodo dificulta o processo de filtragem do mesmo. Logo, são necessários mais estudos para determinação de uma possível relação entre o tamanho dos poros e a distribuição destes poros ao longo do geotêxtil, a qual auxiliaria na definição das melhores características do geotêxtil a ser utilizado. Em 2003, Aydilek e Edil realizaram os mesmos procedimentos, mas acrescentaram ao meio filtrante lascas de madeira e solo e observaram que a camada de lascas de madeira e solo reduz o entupimento dos poros do geotêxtil, o que representa uma maior vida útil ao material geotêxtil.

Fontana, em 2004, avaliou o desempenho operacional e a eficiência do tratamento e desaguamento do lodo por meio do sistema de LD, em escala piloto e escala real. Neste trabalho o autor ressalta que para a implantação de um projeto de LD se faz necessário uma avaliação prévia dos parâmetros ideais para o bom desempenho e maior eficiência da aplicação do sistema. Observou também que os resíduos de ETA com origem dos decantadores e da lavagem dos filtros devem receber tratamentos diferenciados, respectivamente, LD e Sedimentadores. O autor conclui que a utilização do LD, como sistema natural de desaguamento, é viável e eficiente, contudo as conclusões são parciais e exigem mais estudos para reforça-las e tornar o desempenho do LD mais efetivo e preciso.

Os estudos de Achon e Cordeiro (2003), após avaliação comparativa entre os sistemas naturais de desaguamento de lodo LD e Lagoa de Lodo, destacam o alto desempenho e eficiência dos LD na desidratação do lodo. Os autores observaram também que enquanto os LD gastam em torno de sete dias, as Lagoas de Lodo podem levar até meses para remover a água do lodo.

Mendonça et. al. (2004) compararam a eficiência e o desempenho dos Leitos de Secagem e LD para o tratamento de lodo industrial contaminado com derivados do petróleo. Os autores observaram, que em se tratando de lodo contaminado com petróleo, ambos os

sistemas são eficientes para a redução do volume de lodo, remoção de óleo, graxa e redução da DQO (Demanda química de oxigênio), além de tornar o lodo biodegradável (possível de ser tratados em sistema biológicos convencionais).

Barroso, em 2007, avaliou as possíveis relações e interferências das micro e macropropriedades do lodo e de variáveis climáticas no desempenho dos sistemas naturais de desaguamento de LD. O autor confirmou a eficiência e desempenho do LD na redução do volume de lodo, e observou redução, em torno de 90 % do volume do lodo. Barroso (2007), relatou que quanto menor a Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS), maior era a vazão de drenagem do LD e que propriedades como o tamanho das partículas interferem na etapa de drenagem e secagem do lodo. Apesar de destacar como não sendo conclusivas, o autor observou também que variações do pH do lodo podem interferir na capacidade drenante das mantas geotêxteis. Assim como as variáveis climáticas como umidade e insolação também interferem acelerando o processo de desidratação do lodo.

Achon, Barroso e Cordeiro (2008) avaliaram a eficiência e o desempenho do desaguamento de lodo de ETAs, que utilizam diferentes agentes coagulantes como o cloreto de polialumínio e sulfato de alumínio, por meio do sistema de LD. Os autores observaram que o lodo das ETAs que utilizam como coagulante o cloreto de polialumínio ou o sulfato de alumínio apresentam redução semelhantes de volume e porcentagem de sólidos totais. Contudo, o lodo da ETA que utiliza o cloreto de polialumínio como coagulante apresentou um menor tempo de drenagem.

A aplicação do sistema de LD para o desaguamento de lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) foi avaliado em 2011 por Mortara. Diante da eficiência, obtida em trabalhos anteriores, para o desaguamento de lodo de ETAs e lodo industrial, o autor estuda e avalia a possibilidade da utilização deste sistema natural de desaguamento para o tratamento de lodo de ETE. Mortara (2011) avalia o tratamento do lodo com polímeros antes de submetê-los ao desaguamento por LD. Com vistas a determinar o polímero e sua dosagem ideal, pois o excesso desse reagente reduz a vida útil do geotêxtil, em razão deste reagente promover maior viscosidade da água residuária e consequentemente favorecer a colmatação do geotêxtil. O autor observou que o tratamento prévio com polímeros possibilitou a obtenção de um menor tempo de drenagem, o que não foi observada no tempo de secagem do lodo com polímeros quando comparados os lodos que não receberam o polímero.

Os autores dos trabalhos sobre LD destacam a importância do desenvolvimento de mais estudos sobre o sistema, visto que várias questões continuam sem resposta e que o lodo é um resíduo produzido em milhares de toneladas diárias e deve ser corretamente disposto na

natureza. Além disso, não há um único lodo, são várias e diferentes as fontes de lodo, as quais possuem características que exigem tratamentos diferenciados, nestes termos se enquadra o presente estudo.

CAPÍTULO 4

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 GENERALIDADES

Neste trabalho foi avaliado o tratamento de lodo da Estação de Tratamento de Água Bom Jardim da cidade de Uberlândia-MG pelo sistema de Leito de Drenagem (LD) nas fases de drenagem e secagem. Esta ETA realiza o tratamento do tipo ciclo completo cujos processos principais são coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção.

O trabalho foi dividido em duas etapas principais: estudos preliminares com enfoque voltado à escolha de três mantas geotêxteis para comporem os Leitos de Drenagem na etapa seguinte, experimentos com os Leitos de Drenagem para avaliação principalmente de diferentes TAS e influência de parâmetros climáticos. Todo o aparato experimental utilizado era em escala de bancada para facilitar a operacionalização dos experimentos.

Serão descritos a seguir a ETA na qual foram coletadas as alíquotas de lodo, procedimentos metodológicos e as instalações experimentais para cada ensaio conduzido. Foram realizados ensaios preliminares e ensaios com os Leitos de Drenagem. Os ensaios preliminares correspondem aos testes para caracterização do lodo da ETA Bom Jardim e para seleção dos geotêxteis a serem utilizados na composição dos LD dos ensaios seguintes. Os Ensaios com o LD correspondem aos testes realizados para as Taxas de Aplicação de Sólidos (TAS) de $1,75 \text{ kg.m}^{-2}$ (Ensaio I), $3,5 \text{ kg.m}^{-2}$ (Ensaio II) e $7,0 \text{ kg.m}^{-2}$ (Ensaio III). Após a realização destes ensaios foram realizadas análises comparativas dos resultados para a composição de um sistema com melhores configurações e posterior condução do Ensaio IV.

4.2 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA BOM JARDIM EM UBERLÂNDIA-MG

A Estação de Tratamento de Água (ETA) Bom Jardim fica localizada na zona urbana da cidade de Uberlândia, sob a responsabilidade do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), uma autarquia da Prefeitura Municipal. O manancial de abastecimento é o

Ribeirão Bom Jardim, que apresenta uma vazão média de $6,21 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, 25 km de extensão, cuja nascente fica no município de Uberaba - MG. Segundo a resolução CONAMA 357/2005, as águas do manancial de abastecimento são classificadas como classe II.

Na ETA a água bruta é submetida ao tratamento convencional de ciclo completo, na qual é utilizado o sulfato de alumínio como agente coagulante. Desde 2006 todo o sistema público de abastecimento de água de Uberlândia vem passando por um constante processo de modernização, o qual proporcionou economia de 20 % na dosagem de coagulante em um ano, segundo o DMAE. A Figura 6 é uma fotografia da Estação de Tratamento de Água Bom Jardim.

Figura 1 - Estação de Tratamento de Água Bom Jardim.



Fonte: Portal Prefeitura Municipal de Uberlândia

Atualmente o resíduo gerado nesta ETA, durante o processo de tratamento da água, é lançado no rio Uberabinha (que passa pela área urbana da cidade de Uberlândia) o que representa uma fonte potencial e efetiva de poluição. Esta prática pode comprometer a qualidade das águas superficiais e alterar a flora e a fauna local. Neste contexto pode-se observar a importância, em curto e médio prazo, da implantação de um sistema de desaguamento que possibilite o tratamento dos resíduos oriundos da ETA o que destaca a necessidade real do desenvolvimento de trabalhos que estudem as alternativas viáveis ao tratamento deste tipo de resíduo.

Diante da legislação vigente atualmente em Minas Gerais e no Brasil, os lodos de ETAs não podem ser lançados diretamente no curso hídrico e a partir de 2014 nem mesmo em aterros sanitários.

4.3 ENSAIOS PRELIMINARES

4.3.1 Amostra de lodo

Para realização deste trabalho foram coletadas amostras de lodo dos decantadores e água de lavagem dos filtros da ETA Bom Jardim em Uberlândia - MG. O lodo do decantador apresentou altas concentrações de sólidos totais ($28,8 \text{ g.L}^{-1}$) enquanto a água de lavagem de filtros apresentou baixa concentração de sólidos totais ($1,2 \text{ g.L}^{-1}$). Para obtenção de lodo com as características de sólidos compatíveis com os volumes dos Leitos de Drenagem construídos e as taxas de aplicação superficial que seriam testadas, as amostras foram misturadas resultando em uma amostra de lodo com $17,1 \text{ g.L}^{-1}$ de sólidos totais. Essa mistura foi utilizada para o desenvolvimento dos Ensaios I, II e III. Para o desenvolvimento do Ensaio IV foi realizada uma nova coleta de lodo cuja concentração de sólidos foi de $17,2 \text{ g.L}^{-1}$ dispensando a diluição deste. O volume máximo dos Leitos de Drenagem era de $8,8 \text{ L}$ ($h = 0,5 \text{ m}$ e $D = 0,15 \text{ m}$) e, para a análise do sistema com as TAS previstas de $1,75 \text{ kg ST.m}^{-2}$, $3,5 \text{ kg ST.m}^{-2}$ e $7,0 \text{ kg ST.m}^{-2}$ eram necessários $1,8 \text{ L}$, $3,6 \text{ L}$ e $7,2 \text{ L}$ de lodo.

Neste trabalho não foram utilizados produtos químicos no acondicionamento do lodo antes dos experimentos, uma vez que na própria origem do resíduo tais compostos já se encontram em abundância. De fato, Barroso (2007) observou em seus trabalhos que a adição de reagentes químicos ao lodo não promoveu alterações no desempenho do desaguamento por meio do LD, o que justifica, no presente trabalho, a dispensa de utilização de compostos químicos. Além disso, segundo Mortara (2011) a adição de polímeros ao lodo prejudica a desidratação do lodo na fase de secagem.

A composição do lodo das ETAs varia em função das características da água bruta, dos elementos químicos utilizados no tratamento da água, do clima, da vegetação, e ocupação populacional no entorno do manancial. Com isso é possível afirmar que as características do lodo são particulares para cada situação.

4.3.2 Procedimentos metodológicos para caracterização do lodo

Todas as técnicas aplicadas para o desenvolvimento das análises deste trabalho foram realizadas de acordo com a APHA (2005). O lodo bruto ou *in natura* foi avaliado quanto à micropropriedades: pH, temperatura, cor, turbidez, concentração de resíduos sólidos, Demanda Química de Oxigênio, Demanda Bioquímica de Oxigênio e quanto à concentração de metais pesados (Fe, Mn, Cd, Cr, Pb e Al). Quanto às macropropriedades o lodo foi analisado apenas quanto ao Tempo de Drenagem (TDD). O teste de TDD foi adaptado por Mortara (2011) a partir do teste de Drenagem por Gravidade do APHA (2005).

4.3.2.1 Teste para determinação do Tempo de Drenagem

O teste para determinação do Tempo de Filtragem é uma simplificação do método para determinação da resistência específica, em que é aferido somente o tempo de filtragem e é realizada uma análise qualitativa do filtrado. O teste é denominado de Teste do Tempo de Filtragem ou Teste do funil de Buchner. Quando não é utilizado o vácuo, como é o caso deste trabalho, o método é denominado de Drenagem por Gravidade (APHA, 2005).

Mortara (2011) adaptou o teste de Drenagem por Gravidade para seleção dos geotêxteis a serem utilizados na composição dos LD de seu trabalho. O Teste consiste na aferição do tempo necessário para a drenagem de um determinado volume de lodo e o papel filtro é substituído pelo geotêxtil a ser avaliado.

4.3.3 Procedimentos metodológicos para a seleção dos geotêxteis

Para seleção das mantas geotêxteis a comporem os Leitos de Drenagem da fase seguinte foi realizado um pré-teste conforme procedimentos descritos em Mortara (2011). Neste pré-teste, além da determinação do tempo de drenagem, as amostras coletadas do drenado foram avaliadas em função do parâmetro turbidez. Foram avaliadas 16 mantas geotêxteis, conforme ilustra o Quadro 4.

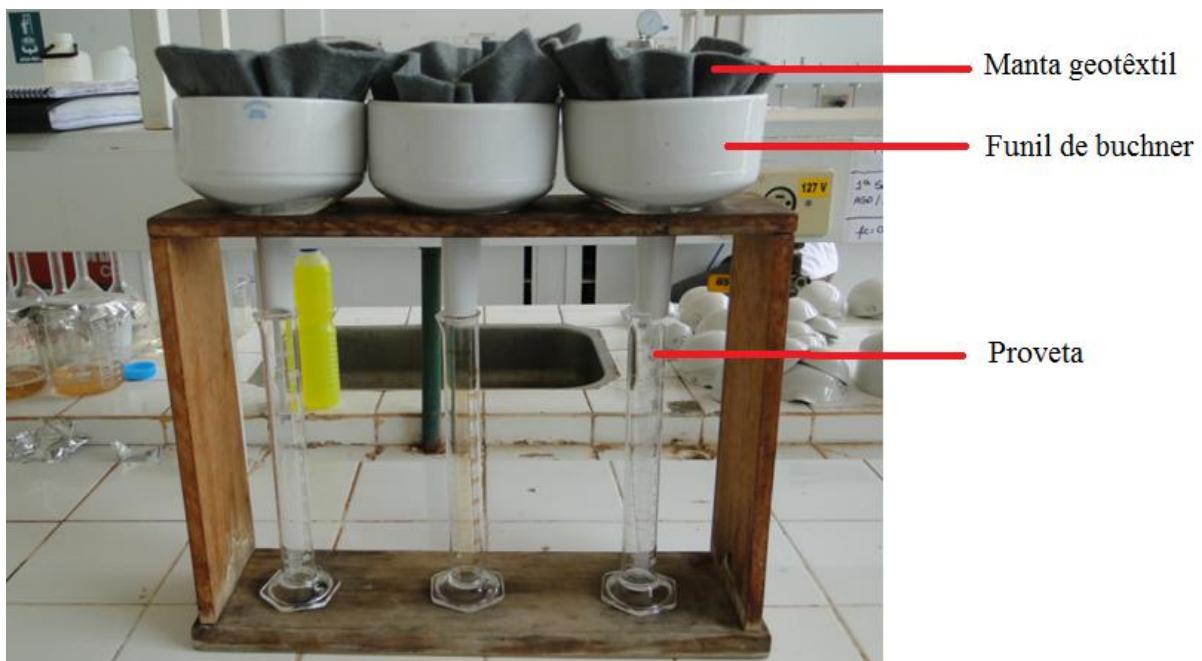
Quadro 4 – Geotêxteis avaliados para a composição dos Leitos de Drenagem.

Geotêxtil	Qtde.	Descrição
Não tecido agulhado de filamentos contínuos 100% poliéster da BIDIM	6	RT-08, RT-14, RT-16, RT-21, RT-26, RT-31
Não tecido agulhado de polipropileno da MACCAFERRI	3	N 26.1, N40.1 e N 30.1
Não tecido agulhado de poliéster da MACCAFERRI	7	N20.2, N26.2, N36.2, N40.2, N60.2, N80.2 e N99.2

Fonte: Autor

O sistema utilizado para o teste, ilustrado na Figura 2, era composto por base em madeira adaptada dos testes de análise de sólidos sedimentáveis, funil de buchner, provetas para coleta do drenado e diferentes mantas geotêxteis condicionadas sobre o funil de buchner. As mantas eram posicionadas de forma adequada para preenchimento de todo o funil, com sobras dos lados de forma a impedir a passagem de lodo pelas laterais do mesmo. Para a realização deste teste as mantas receberam 400 mL de lodo e o Tempo de Drenagem (TDD) foi medido após passagem dos primeiros 50 mL de drenado e depois para os 50 mL seguintes (configurando o que no texto será chamado de 1º TDD e 2º TDD). As amostras coletadas (primeiros 50 mL e próximos 50 mL) foram avaliadas quanto à sua turbidez (configurando o que no texto será chamado de 1º Turbidez e 2º Turbidez). A partir destes dados, foram calculadas as médias aritméticas dos dois valores do TDD e dos dois valores de turbidez, obtidos para todas as mantas testadas. Como critério adotado só foram selecionadas as mantas que apresentaram todos os valores de primeiro e segundo Tempo De Drenagem (1º TDD e 2º TDD) e primeira e segunda turbidez (1ª turbidez e 2ª turbidez) acima das médias aritméticas totais.

Figura 2 – Sistema para desenvolvimento do teste para seleção das mantas geotêxteis a serem aplicadas no LD.



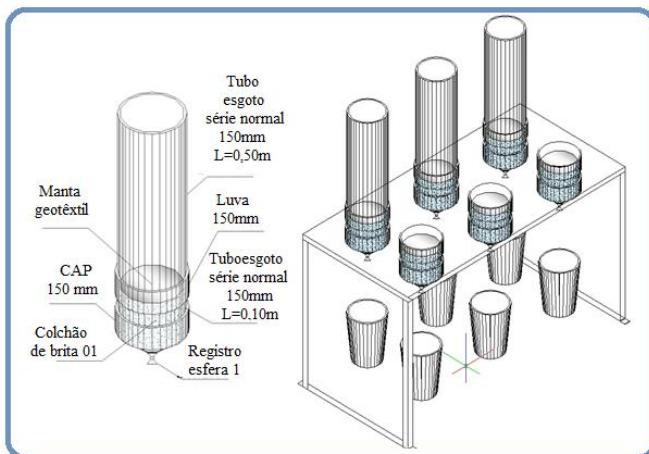
FONTE: Autor

4.4 ENSAIOS COM O SISTEMA DE LEITO DE DRENAGEM

4.4.1 Ensaios I, II e III

4.4.1.1 Instalações experimentais dos Leitos de Drenagem

Os LD utilizados neste trabalho foram compostos por tubo de PVC de 150 mm de diâmetro com 0,5 metros de altura, base com cap de PVC com diâmetro de 150 mm no qual era posicionada a manta geotêxtil e registro de esfera para coleta de amostras, conforme ilustra a Figura 3. A instalação experimental era constituída basicamente por seis Leitos de Drenagem com as dimensões supracitadas, sendo que em três deles foi prevista a redução da influência dos fatores climáticos por meio da manutenção de envoltório (cano de PVC de 0,5 m de altura) na fase de drenagem, enquanto os outros três foram totalmente submetidos a influência dos fatores climáticos sem o envoltório.

Figura 3–Projeto e a aplicação do sistema de LD.**Fonte:** Autor

Neste sentido, no sistema previsto neste trabalho os Leitos de Drenagem foram avaliados com e sem envoltórios, ou seja, os modelos foram avaliados submetidos total ou parcialmente às condições climáticas do local. Tal avaliação pôde destacar e comprovar a ação dos ventos e a importância dos outros fatores climáticos na eficiência da desidratação do lodo na fase de secagem. Os sistemas que tiveram mantidos os envoltórios foram totalmente isolados das ações do vento no processo de desidratação do lodo e parcialmente isolados das outras variáveis climáticas.

4.4.1.2 Procedimentos para avaliação do desempenho dos Leitos de Drenagem - Fase de drenagem

Para a realização dos Ensaios de desaguamento, as amostras foram inicialmente homogeneizadas de forma a manter a mesma concentração de sólidos em todos os experimentos. Logo após a aplicação do lodo nos protótipos foram aferidos os volumes do drenado e coletadas as amostras destes nos tempos de 15, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos e depois a cada 90 minutos até o fim da fase de drenagem. Segundo Barroso (2007), pode ser considerado o fim da fase de drenagem quando cessar a drenagem de água livre ou quando os valores da vazão de drenagem forem menores que $1,67 \cdot 10^{-3} \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. No entanto para a realização deste trabalho foi considerado como o final da fase de drenagem a extinção da lâmina líquida do lodo, assim como para Silveira et. al (2011). A água livre drenada durante os intervalos de tempo descritos anteriormente foram caracterizadas quanto ao volume, cor verdadeira, cor aparente e turbidez. Foram determinadas também as vazões do drenado (Equação 4.1) e o percentual de volume de drenado de água livre em função do tempo. Sendo a variável $Q (\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$ referente à vazão, $V (\text{L})$ ao volume e $t (\text{min})$ ao tempo.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (4.1)$$

Neste trabalho foram avaliadas taxas de aplicação de sólidos (TAS) iguais a $1,75 \text{ kg ST} \cdot \text{m}^{-2}$, $3,5 \text{ kg ST} \cdot \text{m}^{-2}$ e $7 \text{ kg ST} \cdot \text{m}^{-2}$ calculadas conforme a Equação 4.2. Nesta equação o volume de lodo aplicado ao sistema foi representado pela letra $V (\text{L})$, a concentração de sólidos totais do lodo utilizado foi representado por $ST (\text{kg} \cdot \text{L}^{-1})$ e área de fundo do protótipo do LD foi representado por $Af (\text{m}^2)$. Já a equação 4.3 é um rearranjo da equação 4.2 cujo volume de lodo é calculado em função de determinada taxa de aplicação superficial desejada.

$$TAS = \frac{V \cdot ST}{Af} \quad (4.2)$$

$$V = \frac{TAS \cdot Af}{ST} \quad (4.3)$$

O Tempo total de desaguamento foi considerado como sendo a soma do tempo de drenagem com o tempo de secagem, sendo o tempo total de ciclo estipulado em 7 dias conforme critérios adotados por Barroso, (2007) e Silveira et. al.(2011).

4.4.1.3 Procedimentos para avaliação do desempenho dos Leitos de Drenagem - Fase de secagem

O início da fase de secagem era coincidente com o final da fase de drenagem e o resíduo retido na manta geotêxtil era caracterizado quanto ao teor de sólidos (em termos percentuais). Eram coletadas amostras de lodo diariamente para o cálculo do teor de sólidos, até o sétimo dia de experimento no qual o ensaio era interrompido. Este procedimento foi utilizado para condução dos Ensaios I, II, III e IV. Além da avaliação diária do teor de sólidos também foi avaliada a possível influência das variáveis climáticas como temperatura ($^{\circ}\text{C}$), umidade (%), radiação solar (100 kJ.m^{-2}), ventos (m.s^{-1}) e pluviosidade (mm) no desempenho da fase de secagem.

4.4.2 Ensaio IV

4.4.2.1 Instalações experimentais dos Leitos de Drenagem

As instalações descritas na seção 4.4.1.1 foram utilizadas também para o desenvolvimento das análises deste ensaio.

4.4.2.2 Procedimentos para avaliação do desempenho dos Leitos de Drenagem - Fase de drenagem

Foi selecionada a manta cujo desempenho da fase de drenagem apresentou menores valores de cor verdadeira, cor aparente e turbidez, a partir dos Ensaios I, II e III. Também, a partir destes ensaios, foi selecionada a melhor TAS a ser utilizada neste ensaio,

considerando-se a utilização de maiores TAS sem detimento do desempenho da fase de secagem. Logo, os melhores parâmetros foram aplicados ao LD para a realização do Ensaio IV, sendo que as amostras foram avaliadas quanto ao pH, temperatura, cor, turbidez, concentração de resíduos sólidos, Demanda Química de Oxigênio, Demanda Bioquímica de Oxigênio e concentração dos metais pesados Fe, Mn, Cd, Cr, Pb e Al.

4.4.2.3 Procedimentos para avaliação do desempenho dos Leitos de Drenagem - Fase de secagem

Para este Ensaio foram realizados os mesmos procedimentos descritos no item 4.4.1.3.

CAPÍTULO 5

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo apresenta e discute os resultados dos ensaios realizados para o desenvolvimento deste trabalho, de forma a avaliar o desempenho das fases de drenagem e fase de secagem do lodo da ETA Bom Jardim, quando submetido ao desaguamento pelo sistema de LD.

Inicialmente foram conduzidos ensaios preliminares para caracterização do lodo e seleção das mantas a serem aplicadas nos Leitos de Drenagem. Foram realizados quatro ensaios sendo que os ensaios I, II e III referem-se, respectivamente, a avaliação das TAS de $1,75 \text{ kg.m}^{-2}$, $3,5 \text{ kg.m}^{-2}$ e $7,0 \text{ kg.m}^{-2}$ para cada uma das três mantas selecionadas nos ensaios preliminares. Após análise prévia dos resultados obtidos nos ensaios I, II e III foi escolhida a melhor manta geotêxtil e a melhor TAS, em função do desempenho do sistema nas fases de drenagem e de secagem, para serem utilizadas no ensaio IV.

5.1 ENSAIOS PRELIMINARES

5.1.1 Caracterização do lodo

O lodo da ETA Bom Jardim foi avaliado quanto às suas micro e macropropriedades. A única macropropriedade analisada foi relativa ao Tempo de Drenagem (TDD) para cada geotêxtil avaliado. Os valores de TDD obtidos para cada uma das mantas testadas nos ensaios preliminares foram apresentados na seção 4.2.

As micropropriedades avaliadas neste trabalho e seus respectivos valores podem ser observados na Tabela 2 que apresenta também os valores de referência destes parâmetros previstos nas resoluções CONAMA 430 (2011) e COPAM/CERH-MG (2008) que tratam dos padrões de lançamento de efluentes nos corpos hídricos.

Tabela 2 - Micropropriedades do lodo da ETA Bom Jardim e valores dos parâmetros estabelecidos pela COPAM/CERH-MG (2008) e CONAMA 430 (2011) para o descarte de efluentes nos corpos hídricos.

<i>Parâmetros</i>	<i>Unidade</i>	<i>LQ</i>	<i>Lodo decantador</i>	<i>CONAMA 430</i>	<i>COPAM/CERH-MG</i>
			<i>ETA Bom Jardim</i>	(2011)	(2008)
pH	-	-	6,4	5,0-9,0	6-9
Cor aparente	uH	-	N/D	75 ⁺	-
Turbidez	UNT	-	N/D	100	-
Sólidos totais	mg.L ⁻¹	-	17.200	500*	100**
Fe	mg.L ⁻¹	1	47.212	15,0**	15,0
Mn	mg.L ⁻¹	1	726 ⁺⁺	1,0*	1,0
Al	mg.L ⁻¹		86.076 ⁺⁺	0,1*	0,1
Cd	mg.L ⁻¹	0,1	< 0,1 ⁺⁺	0,2	0,1
Cr	mg.L ⁻¹	1	89 ⁺⁺	0,1***	0,5***
Pb	mg.L ⁻¹	1	7,0 ⁺⁺	0,5	0,1
DQO	mg.L ⁻¹ O ₂	1.000	5.060	--	180
DBO	mg.L ⁻¹ O ₂	865	1.647	5	60

(LQ): Limite de Quantificação

(***): hexavalente

(N/D): Não Determinado

(+): cor verdadeira

(*): dissolvidos

(++): mg.kg⁻¹

(**): suspensão

Quando comparados os valores encontrados para o lodo de decantador com os valores limites para o lançamento de efluentes diretamente nos corpos hídricos, foi possível observar que de acordo com as normas federais e estaduais, amparadas pelas leis 13.199 (1999) e 9.433 (1997), esse resíduo não pode ser lançado diretamente nos corpos d'água. Os valores encontrados para o lodo são extremamente maiores que o permitido por lei, o que a curto e médio prazo representam riscos a qualidade das águas do corpo receptor (rio Uberabinha), onde são lançados estes resíduos.

A avaliação comparativa entre os valores encontrados para o lodo e o determinado por lei, destaca a importância da implantação de um sistema de desaguamento do lodo como o LD, o qual apresenta alto desempenho na desidratação e consequente redução do volume de lodo. Quando comparado ao sistema de desaguamento natural constituído por Lagoa de Lodo, exige menor área para implantação, pode apresentar maior vida útil e apresenta melhor desempenho para a desidratação do lodo (ACHON; CORDEIRO, 2003; CORDEIRO et. al., 2001). Quando comparado ao sistema de Leito de Secagem (LS), apresenta como principal vantagem um menor tempo de drenagem (CORDEIRO et. al., 2001; MENDONÇA et. al.,

2004). É importante ressaltar que o lodo desaguado, obtido a partir da aplicação dos LD, apresenta grande concentração de sólidos o que é importante para sua disposição final. Além disso, como descrito por Tsutiya (2001), o lodo de ETA quando desidratado apresenta inúmeras possibilidades de reutilização como a fabricação de cimento, de tijolos e plantação de cítricos.

5.1.2 Seleção das mantas geotêxteis

A metodologia descrita na seção 4.3.3 possibilitou a seleção de três mantas geotêxteis. A seleção das mantas para comporem o LD foi feita por análise comparativa dos valores obtidos para tempo de drenagem (do lodo) e turbidez (do drenado) para cada manta geotêxtil analisada. Neste sentido foram selecionadas somente as mantas que apresentaram todos os valores de tempo de drenagem (TDD) e de turbidez acima das médias aritméticas obtidas para todos os resultados observados de TDD e turbidez. O 1º TDD e a 1ª turbidez são valores referentes aos primeiros 50 mL de água livre drenada do lodo, e o 2º TDD e a 2ª turbidez são valores correspondentes ao 50 mL seguintes de água livre drenada do lodo. Logo, foi coletado o total de 100 mL de água livre drenada do lodo, fracionada nestes dois volumes para a avaliação do desempenho de drenagem da manta em intervalos de tempo diferentes.

Os resultados obtidos para o 1º e 2º TDD e para a 1ª e 2ª turbidez levaram a não utilização de quatro mantas geotêxteis para os cálculos das médias, pois, apresentaram valores extremos do TDD e/ou da turbidez, o que pode-se observar na Tabela 3.

Tabela 3 – Mantas geotêxteis não utilizadas por apresentarem valores extremos de TDD ou até turbidez.

Manta	N26.1	N30.1	N36.2	N40.1
1º) TTD (s)	9	12	1258	14
1ª) Turbidez (UNT)	967	677	192	516
2º) TTD (s)	17	40	389	32
2ª) Turbidez (UNT)	631	114	216	68

Fonte: Autor

Os dados relativos ao 1º e 2º TDD e à 1ª e 2ª turbidez do drenado para cada um dos geotêxteis utilizados para os cálculos das médias estão descritos na Tabela 4. A mesma

tabela apresenta também os valores das médias correspondentes. Em função da análise dos resultados obtidos foram selecionadas as mantas RT-21, RT-26 e RT-31, todas da marca BIDIM, cujas especificações técnicas estão descritas na Tabela 5.

Tabela 4 - Dados referente à análise do Tempo de drenagem e turbidez de 50mL seguida da análise também dos próximos 50mL de drenado.

Manta	N20.2	N60.2	N40.2	N26.2	N80.2	RT-21	Média
1º) TTD (s)	29	99	121	63	56	27	59
1ª) Turbidez (UNT)	382	245	227	269	214	218	268
2º) TTD (s)	36	122	160	113	65	54	76
2ª) Turbidez (UNT)	266	258	241	256	253	156	202

Manta	N99.2	RT-26	RT-16	RT-14	RT-31	RT-08	Média
1º) TTD (s)	196	23	22	22	32	20	59
1ª) Turbidez (UNT)	210	268	325	352	194	311	268
2º) TTD (s)	136	46	45	33	53	45	76
2ª) Turbidez (UNT)	201	167	149	148	166	160	202

Fonte: Autor

Tabela 5-Especificações técnicas dos geotêxteis avaliados nos Leitos de Drenagem

<i>Propriedades Manta</i>		RT-21	RT-26	RT-31
Propriedades Hidráulicas	Permissividade (s^{-1})	1,1	0,8	0,8
	Fluxo de água (L/min./m ²)	3.420	2.760	2.340
	Condutividade hidráulica (cm/s)	0,37	0,37	0,37
	Abertura aparente (O ₉₅) (mm) (peneira)	0,150 (100)	0,150 (100)	0,125 (120)
Propriedades Físicas	Matéria-prima e tecnologia	100% poliéster-filamentos contínuos		
	Ponto de fusão (°C)	260	260	260

Fonte: BIDIM, 2011.

5.2 ENSAIOS COM OS LEITOS DE DRENAGEM

Nesta seção são abordados os resultados obtidos na operação do sistema de Leito de Drenagem aplicado ao tratamento de lodo da ETA Bom Jardim em Uberlândia - MG. A seção foi subdividida em Ensaio I, Ensaio II, Ensaio III, análise comparativa entre os Ensaios I, II e III e Ensaio IV. Os resultados obtidos para os Ensaios I, II e III são apresentados da seguinte maneira:

- Avaliação do desempenho geral dos Leitos de Drenagem - Fase de drenagem: desempenho do sistema a partir da avaliação dos valores de vazão e volume de drenado de água livre;
- Avaliação do desempenho parcial dos Leitos de Drenagem - Fase de drenagem: desempenho e eficiência do sistema a partir da avaliação dos parâmetros de cor aparente, cor verdadeira e turbidez ao longo do tempo de drenagem.
- Avaliação do desempenho dos Leitos de Drenagem - Fase de secagem: desempenho da redução do teor de sólidos diários em função das variáveis climáticas.

A análise comparativa entre os resultados obtidos nos Ensaios I, II e III permitiu principalmente a obtenção de parâmetros operacionais mais adequados considerando-se a qualidade final do drenado e do lodo seco, ou seja, a partir desta escolha foi conduzido o Ensaio IV.

Os resultados obtidos para o Ensaio IV são apresentados da mesma maneira que os outros ensaios, no entanto, foi realizada uma análise geral mais completa com avaliação de parâmetros, além da cor e turbidez, como pH, temperatura, concentração de resíduos sólidos, Demanda Química de Oxigênio, Demanda Bioquímica de Oxigênio e quanto à concentração de metais pesados (Fe, Mn, Cd, Cr, Pb e Al). Logo. Neste ensaio não foi realizada a análise parcial da fase de drenagem.

5.2.1 ENSAIO I

As análises relativas ao Ensaio I foram conduzidas com as mantas selecionadas na seção 5.1.2, ou seja, mantas RT-21, RT-26 e RT-31, da marca BIDIM, as quais após disposição sobre o sistema de LD foram submetidas à TAS de 1,75 kg.m⁻². Como o lodo

avaliado apresentou $17,1 \text{ g.L}^{-1}$ de sólidos e a base do LD tinha área de $0,0177 \text{ m}^2$ foram necessários $1,8 \text{ L}$ de lodo.

5.2.1.1 Avaliação do desempenho dos Leitos de Drenagem - Fase de drenagem

5.2.1.1.1 Avaliação do desempenho geral da fase de drenagem

Para a análise da fase de drenagem foram aferidas a vazão, volume parcial e acumulado de água livre drenada, valores estes observados nas Tabelas 6 para a manta RT-21, Tabela 7 para a manta RT-26 e Tabela 8 para a manta RT-31. Os resultados demonstraram que os tempos de drenagem para as três mantas foram de aproximadamente três horas (180 minutos).

Tabela 6 - Dados referentes ao perfil de drenagem do lodo da ETA Bom Jardim, quando submetido ao desaguamento por LD constituído pela manta RT-21.

Tempo (min.)	Vazão (mL.min^{-1})	Volume Drenado (mL)	Volume drenado acumulado (%)
15	38,67	580	32,2
30	5,00	150	40,6
45	2,89	130	47,8
60	0,92	55	50,8
90	1,55	140	58,6
180	0,55	100	64,2

Fonte: Autor

Tabela 7 - Dados referentes ao perfil de drenagem do lodo da ETA Bom Jardim, quando submetido ao desaguamento por LD constituído pela manta RT-26.

Tempo (min.)	Vazão (mL.min^{-1})	Volume Drenado (mL)	Volume drenado acumulado (%)
15	35,33	530	29,4
30	5,00	150	37,8
45	2,88	130	45,0
60	0,88	53	47,9
90	1,49	134	55,4
180	1,22	220	67,6

Fonte: Autor

Tabela 8 - Dados referentes ao perfil de drenagem do lodo da ETA Bom Jardim, quando submetido ao desaguamento por LD constituído pela manta RT-31.

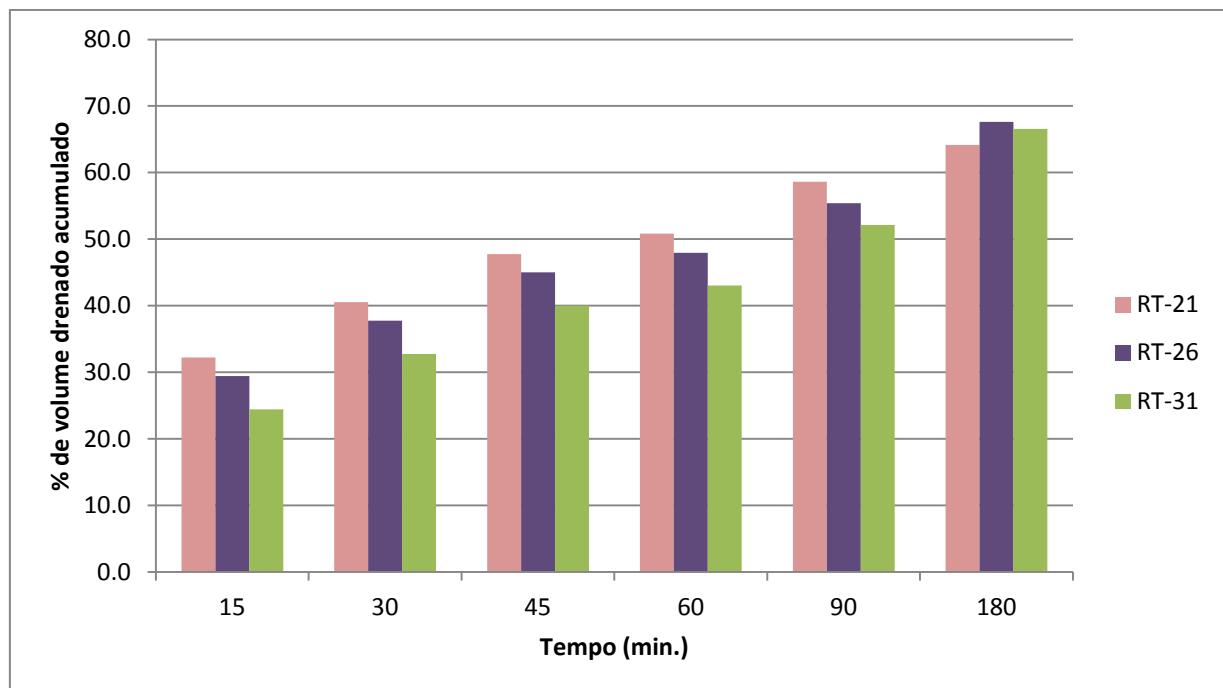
Tempo (min.)	Vazão ($mL\cdot min^{-1}$)	Volume Drenado (mL)	Volume drenado acumulado (%)
15	29,33	440	24,4
30	5,00	150	32,8
45	2,88	130	40,0
60	0,92	55	43,2
90	1,81	163	52,1
180	1,40	260	66,6

Fonte: Autor

Barroso (2007) considerou como sendo o final da fase de drenagem o cessar do processo de drenagem de água livre ou quando o valor da vazão do drenado fosse de aproximadamente $1,67 \cdot 10^{-3} L\cdot min^{-1}$ ou $1,67 mL\cdot min^{-1}$. No entanto foi possível observar que para todas as mantas, quando a vazão do drenado atingiu valores próximos a $1,67 mL\cdot min^{-1}$, ainda havia drenagem de volumes consideráveis. Logo, foi considerado como o final da fase de drenagem o instante em que não houve lámina de água no lodo retido na manta geotêxtil, conforme recomenda Silveira et. al. (2011). As Tabelas 6, 7 e 8 demonstram que ao longo do tempo há redução da vazão do drenado, valores estes que apresentam comportamento inversamente proporcional ao acúmulo de drenado. Esse comportamento pode ser justificado pela obstrução dos poros do geotêxtil por partículas sólidas do lodo retidas na manta o que dificulta a passagem do drenado e pela redução d' água livre a ser drenada.

Os dados apresentados na Figura 4 demonstram que os geotêxteis avaliados, apresentaram valores percentuais próximos de drenado de água livre acumulada ao final da fase de drenagem. Para as mantas RT-21, RT-26 e RT-31, os valores de água livre acumulada ao final da fase de drenagem, quando comparado ao volume de lodo introduzido, foram respectivamente 64,2 %, 67,6 % e 66,6 %. Valores estes muito próximos devido às semelhanças das propriedades hidráulicas entre as mantas. A pequena diferença de volume de drenado entre as mantas pode ser justificada, segundo Barroso (2007), pela interferência de fatores como a TAS e também de parâmetros como o pH do lodo na capacidade drenante dos geotêxteis, o qual favoreceu a manta RT-26, que apresentou um volume acumulado de água livre um pouco maior.

Figura 4 - Volume de água livre drenada nos Leitos de Drenagem compostos pelas manta RT-21, RT-26 e RT-31, à TAS = 1,75 kg.m⁻².



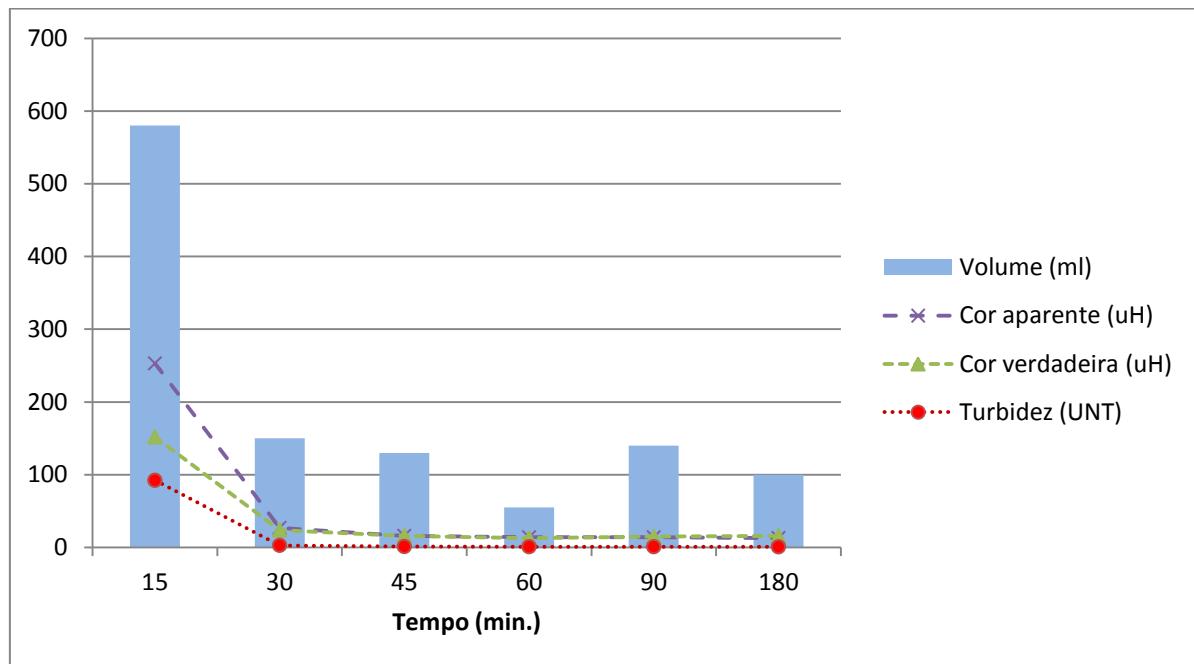
Fonte: Autor.

5.2.1.1.2 Avaliação do desempenho parcial da fase de drenagem

As análises para avaliação do drenado foram conduzidas em amostras coletadas em intervalos de tempo pré-fixados. As Figuras 5, 6 e 7 representam os resultados obtidos para tempos de coleta de 15, 30, 45, 60, 90 e 180 minutos. Conforme as figuras, percebe-se que há uma tendência de decréscimo nos valores dos parâmetros medidos, em função, provavelmente, da obstrução dos poros do geotêxtil pelas partículas menores de lodo, conforme também observado em Barroso (2007) e Mortara (2011). Na Figura 5 observa-se que o volume de drenado de água livre da manta RT-21 no intervalo de tempo de 90 a 180 minutos foi menor que no intervalo de 60 a 90 minutos. Como possível explicação para este comportamento do sistema vale ressaltar que o lodo de ETA é constituído por partículas sólidas de tamanhos intermediários como folhas e galhos de árvores (resíduos estes que não foram retidos na etapa de gradeamento do sistema de tratamento de água) que segundo Barroso (2007) quando retidos na manta podem reduzir a capacidade filtrante do geotêxtil na fase de drenagem. No entanto, este comportamento também pode ser devido à redução do volume de água livre disponível para atravessar o Leito de Drenagem. É importante observar que tanto na fase de drenagem como na fase de secagem, há retirada de água livre do lodo, ou

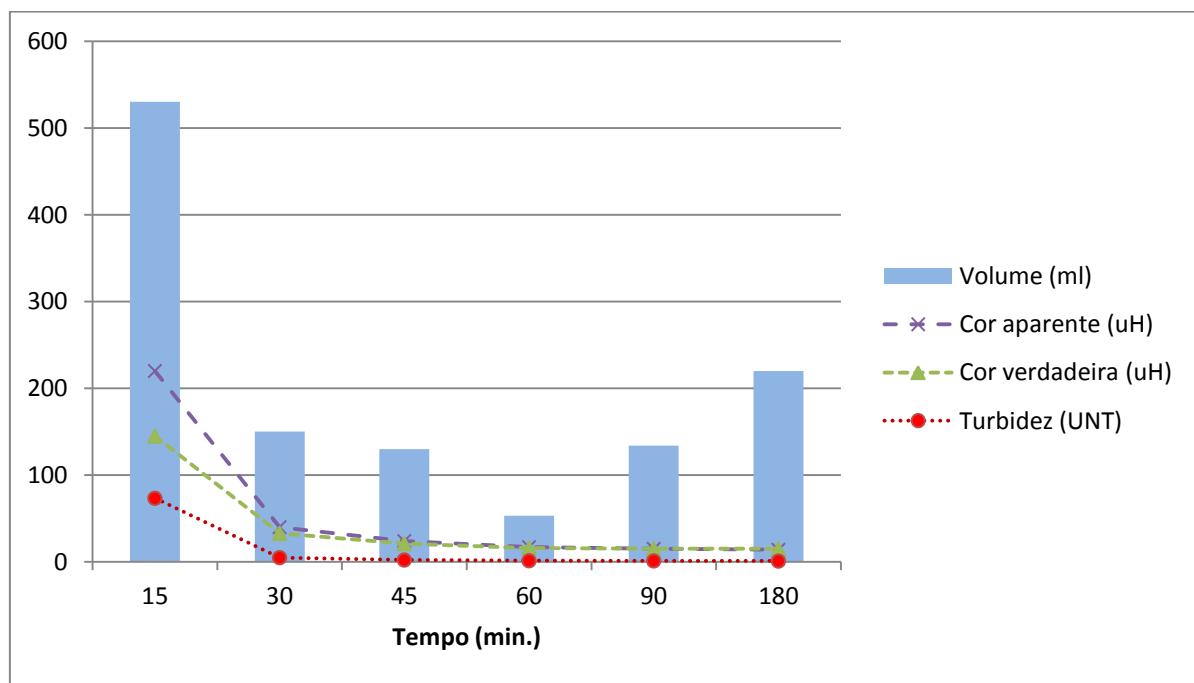
seja, ambos exercem ação conjunta no desempenho de desidratação do lodo pelo sistema de LD.

Figura 5 – Dados de volume, turbidez, cor verdadeira e cor aparente ao longo do tempo de drenagem da manta RT-21 submetida à TAS = 1,75 kg.m⁻².



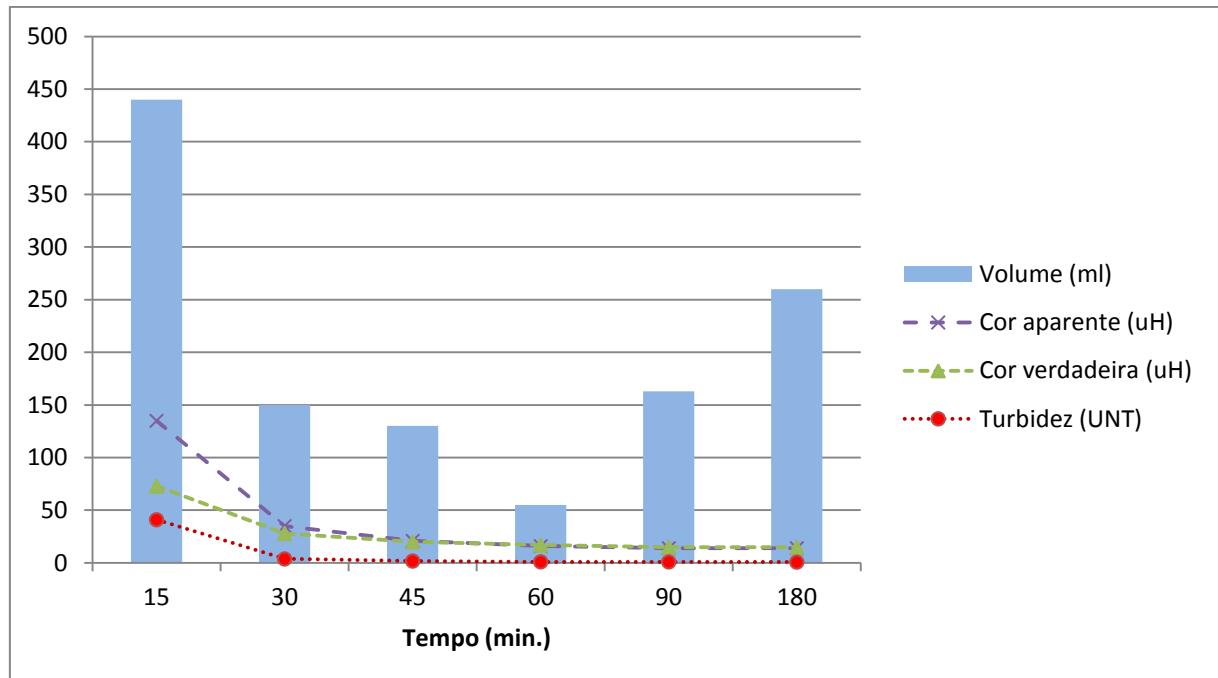
Fonte: Autor

Figura 6 - Dados de volume, turbidez, cor verdadeira e cor aparente ao longo do tempo de drenagem da manta RT-26 submetida à TAS = 1,75 kg.m⁻².



Fonte: Autor

Figura 7 - Dados de volume, turbidez, cor verdadeira e cor aparente ao longo do tempo de drenagem da manta RT-31 submetida à TAS = 1,75 kg.m⁻².



Fonte: Autor

Os resultados referentes à cor aparente, cor verdadeira e turbidez ao longo do tempo, obtidos para os primeiros 15 minutos, demonstram que os valores destes parâmetros são elevados para as três mantas geotêxteis analisadas conforme ilustram as Figuras 5, 6 e 7. As amostras apresentaram valores de cor aparente 253, 220 e 135 uH, cor verdadeira 152, 145 e 73 uH, turbidez 92, 73 e 41 UNT, respectivamente, para os geotêxteis RT-21, RT-26 e RT-31. A redução dos parâmetros avaliados foi significativa, de aproximadamente 93,6 % (média aritmética) para os valores de turbidez nas mantas RT-21, RT-26 e RT-31. Essa diferença pode ser justificada pela retenção de partículas sólidas nos poros, o que consequentemente reduz o diâmetro destes de forma a propiciar um drenado mais clarificado.

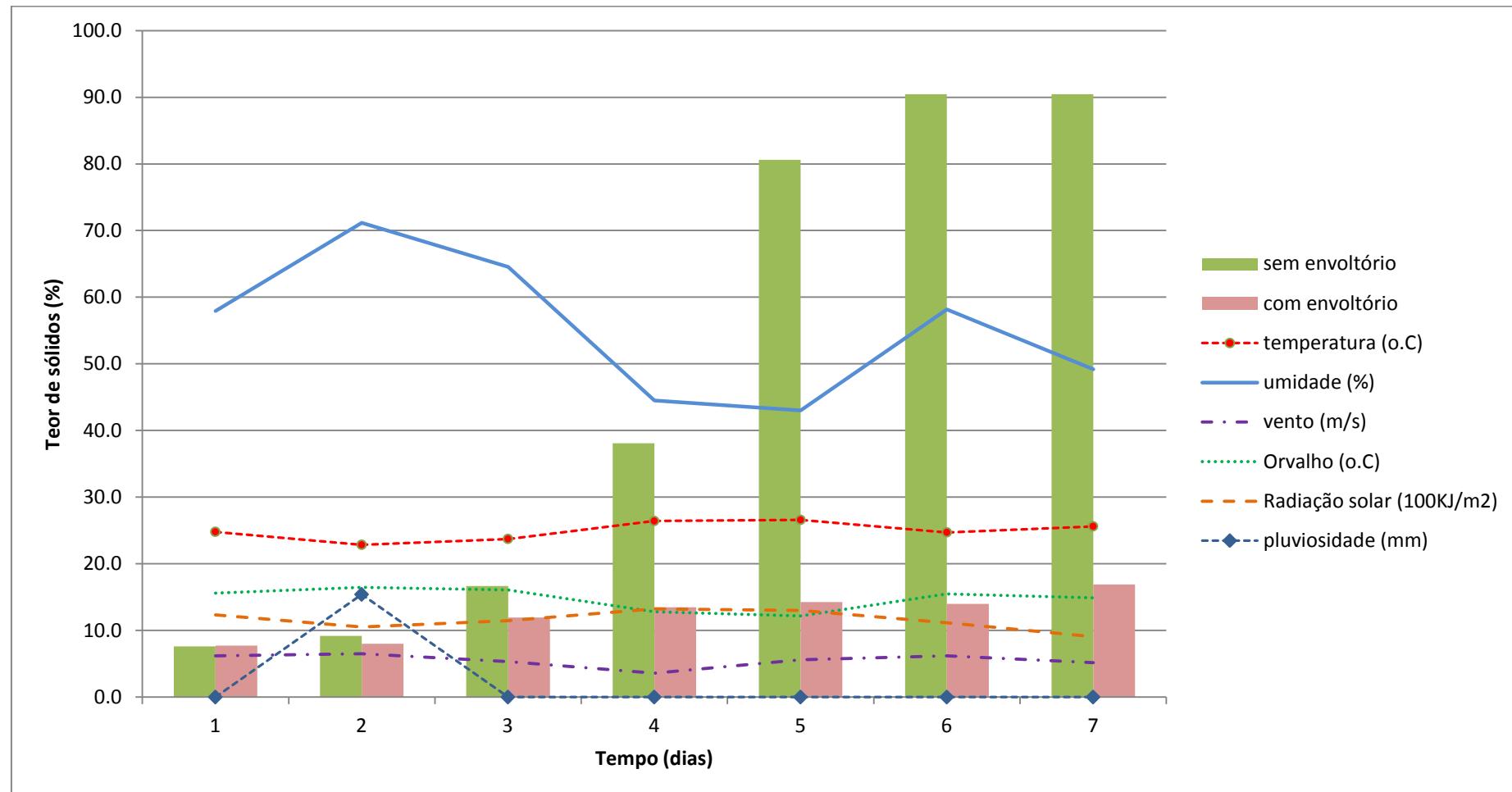
5.2.1.2 Avaliação do desempenho Leitos de Drenagem - Fase de secagem

Os Leitos de Drenagem constituídos pelos geotêxteis RT-21, RT-26 e RT-31 foram avaliados, diariamente em duplicata, para análise da interferência diária das variáveis climáticas no desempenho da fase de secagem dos Leitos de Drenagem, variáveis essas: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), umidade (%), vento (m.s^{-1}), orvalho ($^{\circ}\text{C}$), radiação solar (100 kJ.m^{-2}) e

pluviosidade (mm). As análises foram realizadas em duplicata, pois em um sistema de LD era mantido o cano PVC (envoltório) de 0,5 m utilizado para introdução do volume de lodo necessário para a aplicação da TAS de $1,75 \text{ kg.m}^{-2}$, e no outro sistema o cano PVC (envoltório) era retirado logo após finalizada a fase de drenagem, sendo assim o primeiro sistema era submetido parcialmente a ação das variáveis climáticas e o segundo era totalmente submetido a ação das variáveis climáticas.

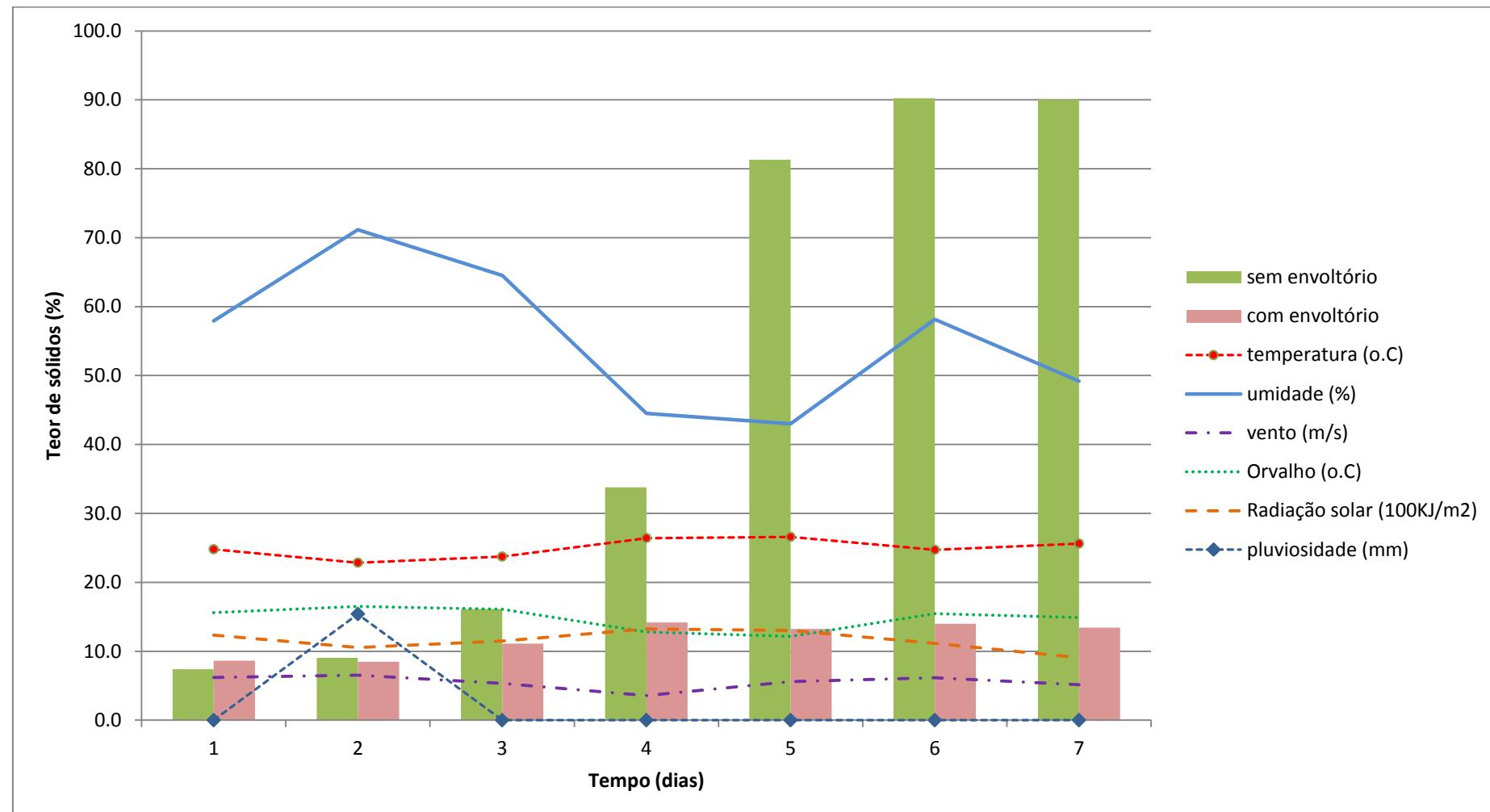
As Figuras 8, 9 e 10 apresentam os resultados obtidos para teor de sólidos e variáveis climáticas dos sistemas de LD compostos, respectivamente, pelas mantas geotêxteis RT-21, RT-26 e RT-31.

Figura 8 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-21, submetida à TAS = 1,75 kg.m⁻², com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.



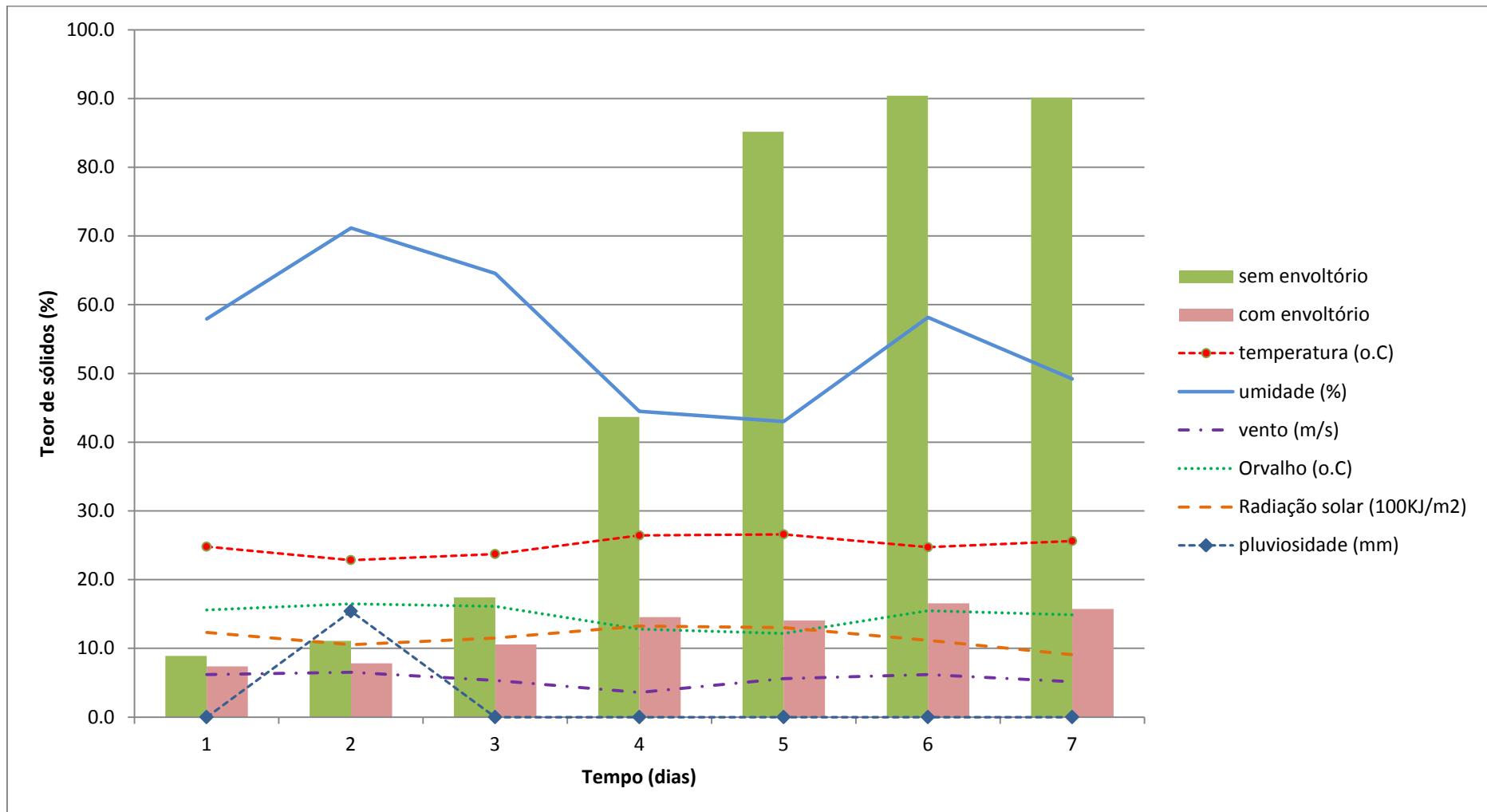
Fonte: Autor

Figura 9 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-26, submetida à TAS = 1,75 kg.m⁻², com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.



Fonte: Autor

Figura 10 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-31, submetida à TAS = 1,75 kg.m⁻², com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.



Fonte: Autor

Conforme ilustram as Figuras 8, 9 e 10 são apresentados os valores diários de teor de sólidos do lodo retido nos sistemas com e sem envoltório em correlação com os valores das variáveis climáticas. Segundo Cordeiro (2001), Barroso (2007) e Achon, Barroso e Cordeiro (2008), as variáveis climáticas são fundamentais e indispensáveis ao bom desempenho da desidratação do lodo na fase de secagem. Os Leitos de Drenagem constituídos pelos geotêxteis RT-21, RT-26 e RT-31 foram submetidos ao desaguamento no mesmo período de tempo, sendo assim foram submetidos às mesmas variações climáticas. Para o estudo da interferência das variáveis climáticas, a média destes valores foi calculada a partir dos valores instantâneos no intervalo de 24 horas anteriores ao horário da coleta durante a semana.

A partir dos resultados observados nas Figuras 8, 9 e 10 para a variação diária do teor de sólidos dos Leitos de Drenagem com e sem envoltório, foi possível destacar e enfatizar a importância e a ação das variáveis climáticas na desidratação do lodo. Foi possível observar que o lodo coletado no segundo dia foi submetido a um volume de chuva distribuído entre as 18:00 h do primeiro dia e as 2:00 h do dia da coleta (segundo dia), que acompanhado da ação do orvalho no período noturno, contribuiu para uma menor diferença entre os valores do teor de sólidos do lodo submetido aos sistemas com e sem envoltórios. Os valores das variáveis climáticas relativas ao segundo dia da fase de secagem são mostrados no Apêndice 1. Esta diferença no teor de sólidos dos sistemas de LD com e sem envoltório foi significativamente maior nos outros dias de experimento devido, provavelmente à ação conjunta de variáveis como radiação solar, umidade, ventos e temperatura. O menor valor observado para a diferença do teor de sólidos do lodo dos dois sistemas foi de 0,6 %, o maior valor foi de 73,6 %, perfazendo uma média de 35,8 % ao final do sétimo dia de experimento (fase de secagem).

Segundo Barroso (2007) a radiação solar é responsável pelo fornecimento de energia térmica para a evaporação da água contida no lodo, a qual durante essa semana foi praticamente constante, cerca de $10 \cdot 10^2 \text{ kJ.m}^{-2}$, o que contribuiu com a desidratação do lodo. A umidade relativa do ar que variou entre 45 e 70 % o que contribuiu com os menores valores do teor de sólidos do lodo retido nos Leitos de Drenagem com envoltório. Os ventos também foram constantes durante a semana, com valores de velocidade próximos de 8 m.s^{-1} , os quais segundo Barroso (2007) são fundamentais para a desidratação do lodo, pois, são os responsáveis pela circulação do ar ou troca do ar com água evaporada do lodo por um ar mais seco que consequentemente receberá mais vapor d'água. A ação dos ventos é exclusiva sobre o LD sem envoltório, o que acentua o processo de desidratação nestes, e justifica os maiores

valores do teor de sólidos nos Leitos de Drenagem sem envoltório. No entanto, é importante destacar que o processo de desidratação do lodo depende do conjunto de variáveis climáticas que compõe o clima da região.

5.2.2 Ensaio II

As análises relativas ao Ensaio II foram realizadas com as mantas selecionadas na seção 5.1.2, ou seja, mantas RT-21, RT-26 e RT-31, da marca BIDIM, as quais após disposição sobre o sistema de LD foram submetidas à TAS de $3,5 \text{ kg.m}^{-2}$. Como o lodo avaliado apresentou $17,1 \text{ g.L}^{-1}$ de sólidos totais e a base do LD tinha área de $0,017 \text{ m}^2$ foram necessários 3,6 L de lodo.

5.2.2.1 Avaliação do desempenho dos Leitos de Drenagem - Fase de drenagem

Assim como no Ensaio I (seção 4.3), para a análise da fase de drenagem foram aferidas a vazão, volume parcial e acumulado de água livre drenada, valores estes observados nas Tabelas 9 para a manta RT-21, Tabela 10 para a manta RT-26 e Tabela 11 para a manta RT-31. Os resultados demonstraram que o tempo de drenagem para as três mantas foram de aproximadamente sete horas (420 minutos).

Tabela 9 - Dados referentes ao perfil de drenagem do lodo da ETA Bom Jardim, quando submetido ao desaguamento por LD constituído pela manta RT-21.

<i>Tempo (min.)</i>	<i>Vazão (mL.min⁻¹)</i>	<i>Volume Drenado (mL)</i>	<i>Volume drenado acumulado (%)</i>
15	44,0	660	18,0
30	6,2	185	23,5
45	2,9	130	27,1
60	1,8	105	30,0
90	1,7	150	34,2
120	1,0	120	37,5
210	1,3	280	45,3
300	0,8	230	51,7
390	0,5	195	57,1

Fonte: Autor**Tabela 10 - Dados referentes ao perfil de drenagem do lodo da ETA Bom Jardim, quando submetido ao desaguamento por LD constituído pela manta RT-26.**

<i>Tempo (min.)</i>	<i>Vazão (mL.min⁻¹)</i>	<i>Volume Drenado (mL)</i>	<i>Volume drenado acumulado (%)</i>
15	49,3	740	21,0
30	6,5	195	26,0
45	2,9	130	29,6
60	1,8	105	32,5
90	1,8	60	36,9
120	1,0	120	40,3
210	1,4	290	48,3
300	0,8	250	55,3
390	0,5	200	60,8

Fonte: Autor**Tabela 11 - Dados referentes ao perfil de drenagem do lodo da ETA Bom Jardim, quando submetido ao desaguamento por LD constituído pela manta RT-31.**

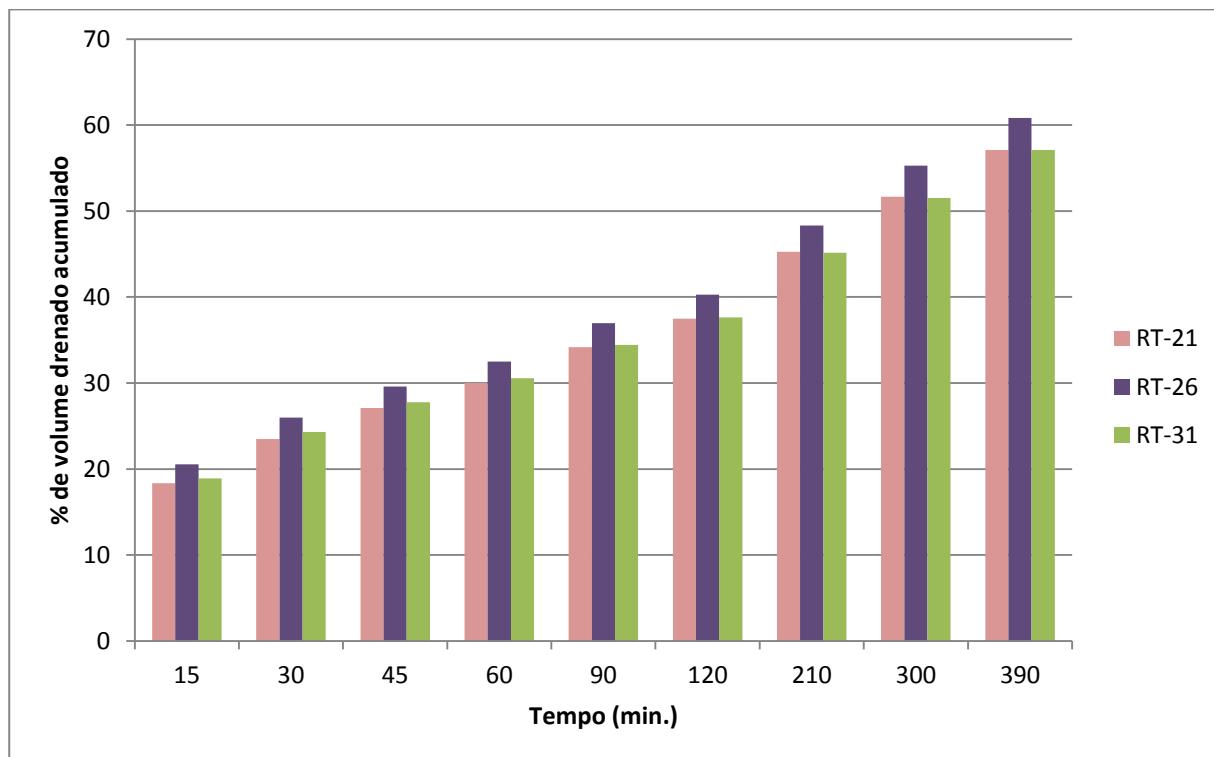
<i>Tempo (min.)</i>	<i>Vazão (mL.min⁻¹)</i>	<i>Volume Drenado (mL)</i>	<i>Volume drenado acumulado (%)</i>
15	45,3	680	19,0
30	6,5	195	24,3
45	2,8	125	27,8
60	1,7	100	30,6
90	1,6	140	34,4
120	1,0	115	37,6
210	1,3	270	45,1
300	0,8	230	51,5
390	0,5	200	57,1

Fonte: Autor

As Tabelas 9, 10 e 11 demonstram o que foi observado também com a TAS = 1,75 kg.m⁻², que ao longo do tempo há uma redução da vazão do drenado, inversamente proporcional ao acúmulo de drenado, o que pode ser justificado pela obstrução dos poros do geotêxtil pelas partículas sólidas do lodo retidas no geotêxtil.

Os dados apresentados na Figura 11 demonstram que os geotêxteis avaliados, apresentaram valores percentuais aproximados de drenado de água livre acumulada ao final da fase de drenagem. Para as mantas RT-21, RT-26 e RT-31, os valores de água livre acumulada ao final da fase de drenagem foram respectivamente 57, 60 e 57 %. Valores estes muito próximos devido à semelhança das propriedades hidráulicas entre as mantas. O geotêxtil RT-26 apresentou também o maior acúmulo de volume de água livre drenada, assim como na TAS = 1,75 kg.m⁻², o que confirma que apesar das diferentes TAS o comportamento drenante da manta é semelhante para a manta RT-26.

Figura 11 - Volume de água livre drenada nos Leitos de Drenagem compostos pelas manta RT-21, RT-26 e RT-31, a TAS = 3,5 kg.m⁻².

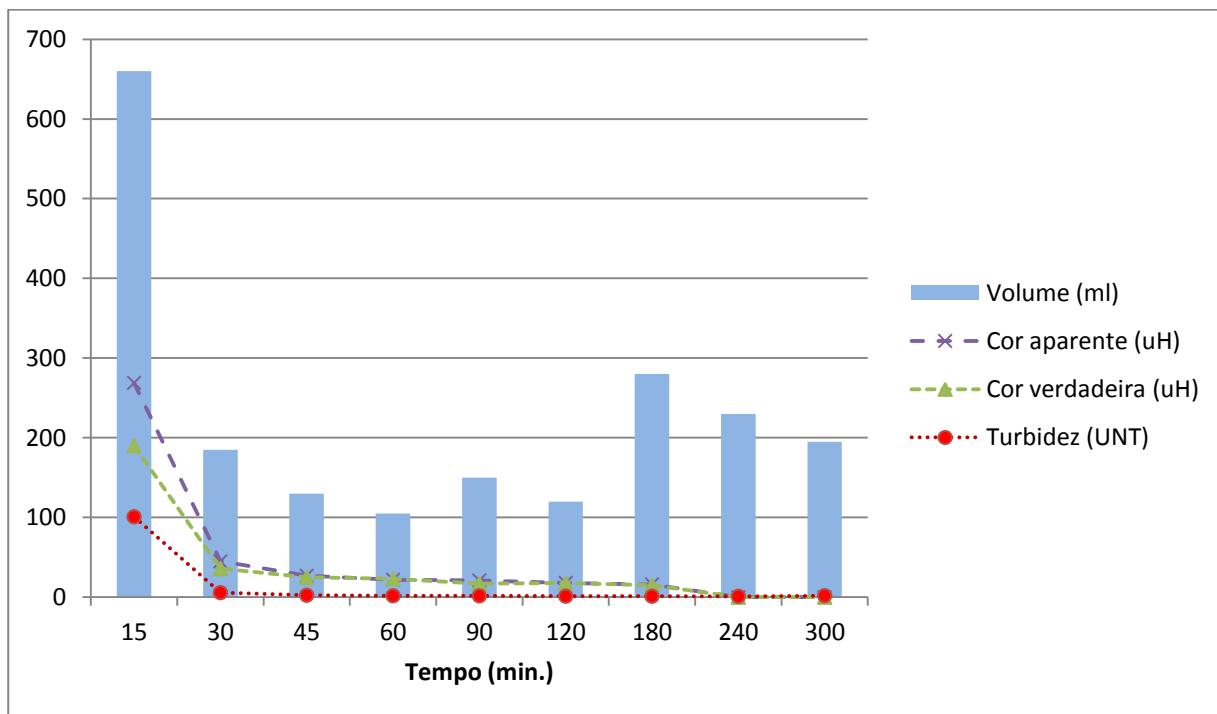


Fonte: Autor

5.2.2.1.2 Avaliação do desempenho parcial da fase de drenagem

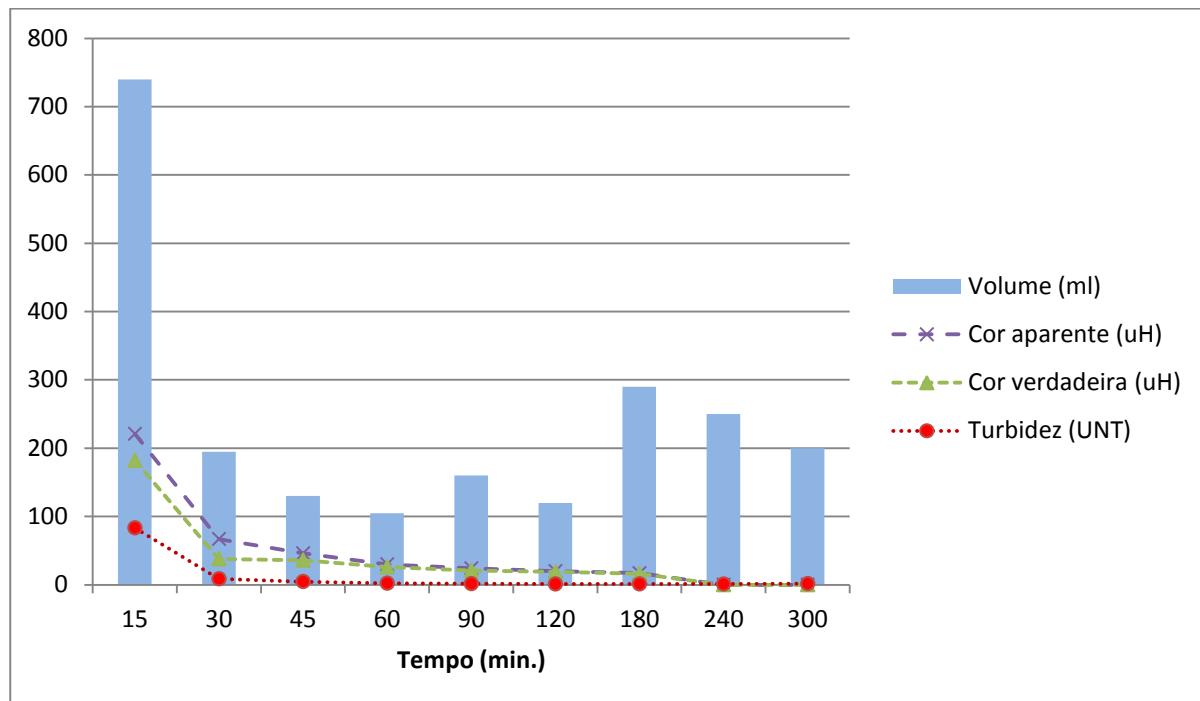
As análises para avaliação do drenado foram conduzidas em amostras coletadas em intervalos de tempo pré-fixados. As Figuras 12, 13 e 14 representam os resultados obtidos para tempos de coleta de 15, 30, 45, 60, 90 e 120, 210, 300 e 390 minutos, diferente do primeiro Ensaio (seção 5.2.1.1.2) devido a diferente TAS e consequente diferença do tempo de drenagem total. Conforme as figuras percebe-se que a distribuição do volume de drenado de água livre do lodo é proporcional ao intervalo de tempo, ou seja, maior o intervalo de tempo de drenagem maior o volume de drenado de água livre, como ocorreu no ensaio anterior. Foi possível observar também que há uma tendência de decréscimo nos valores dos parâmetros medidos, em função, provavelmente, da obstrução dos poros do geotêxtil pelas partículas menores de lodo, conforme também observado em Barroso (2007) e Mortara (2011).

Figura 12 - Dados de volume, turbidez, cor verdadeira e cor aparente ao longo do tempo de drenagem da manta RT-21 submetida à TAS = 3,5 kg.m⁻².



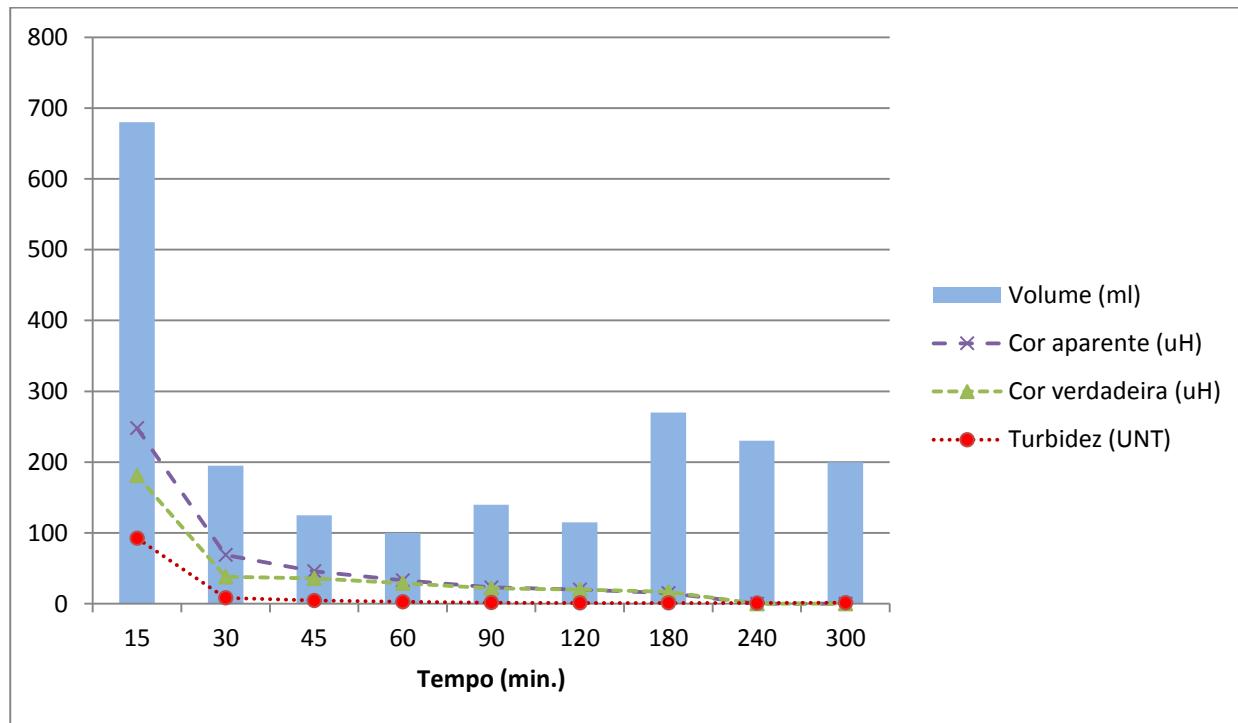
Fonte: Autor

Figura 13 - Dados de volume, turbidez, cor verdadeira e cor aparente ao longo do tempo de drenagem da manta RT-26 submetida à TAS = 3,5 kg.m⁻².



Fonte: Autor

Figura 14 - Dados de volume, turbidez, cor verdadeira e cor aparente ao longo do tempo de drenagem da manta RT-31 submetida à TAS = 3,5 kg.m⁻².



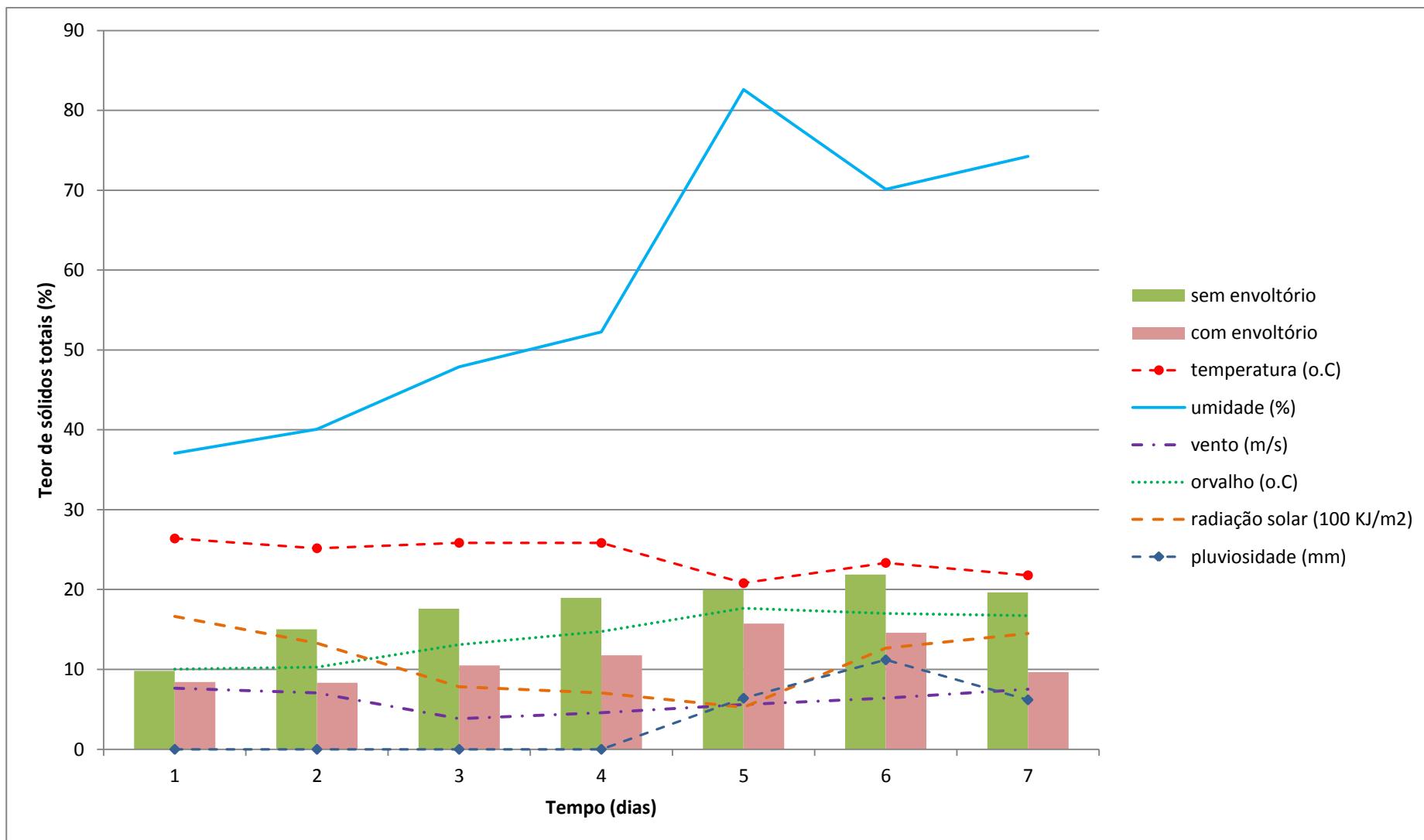
Fonte: Autor

Os resultados referentes à cor aparente, cor verdadeira e turbidez ao longo do tempo apresentaram curvas com comportamento semelhante ao ocorrido com os Leitos de Drenagem submetidos a $TAS = 1,75 \text{ kg.m}^{-2}$, com valores elevados para o drenado de água livre, dos três geotêxteis, nos primeiros 15 minutos (Figuras 12, 13 e 14). Valores estes de cor aparente de 269, 221 e 248 uH, cor verdadeira 190, 182 e 181 uH, turbidez 101, 83 e 93 UNT, respectivamente para os geotêxteis RT-21, RT-26 e RT-31. Os resultados demonstram também que a partir de 15 minutos há uma redução significativa, de aproximadamente 91,6 % (média aritmética), dos valores de turbidez nas mantas RT-21, RT-26 e RT-31. Essa diferença pode ser justificada pela retenção de partículas sólidas do lodo nos poros, o que consequentemente reduz o diâmetro destes de forma a propiciar um drenado mais clarificado.

5.2.2.2 Avaliação do desempenho dos Leitos de Drenagem - Fase de secagem

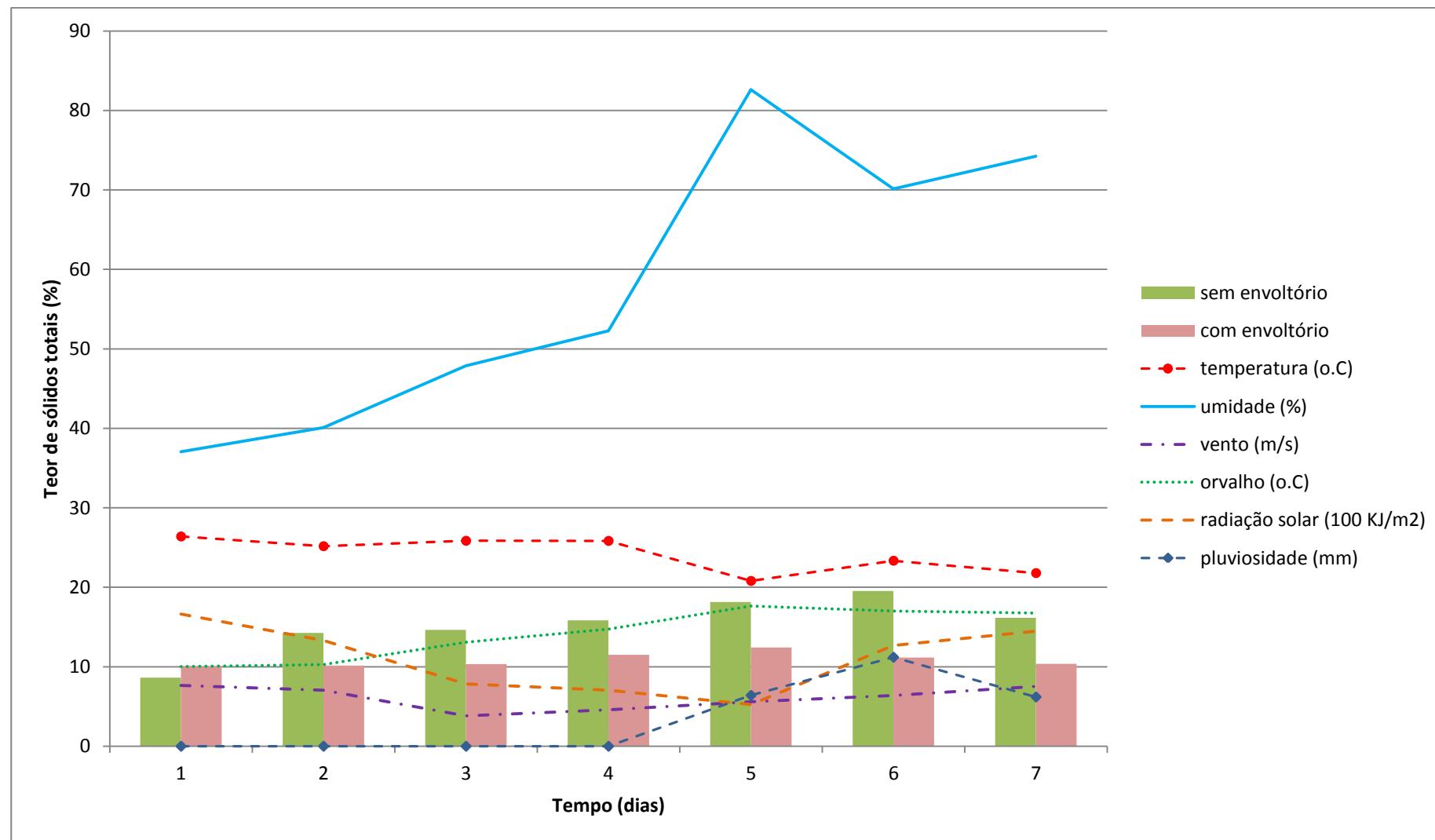
Para a obtenção destes resultados foram realizados os mesmos procedimentos descritos anteriormente, no entanto os sistemas LD receberam lodo a uma $TAS = 3,5 \text{ kg.m}^{-2}$. As Figuras 15, 16 e 17 apresentam os resultados obtidos para teor de sólidos e variáveis climáticas dos sistemas de LD compostos, respectivamente, pelas mantas geotêxteis RT-21, RT-26 e RT-31.

Figura 15 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-21, submetida à TAS = 3,5 kg.m⁻², com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.



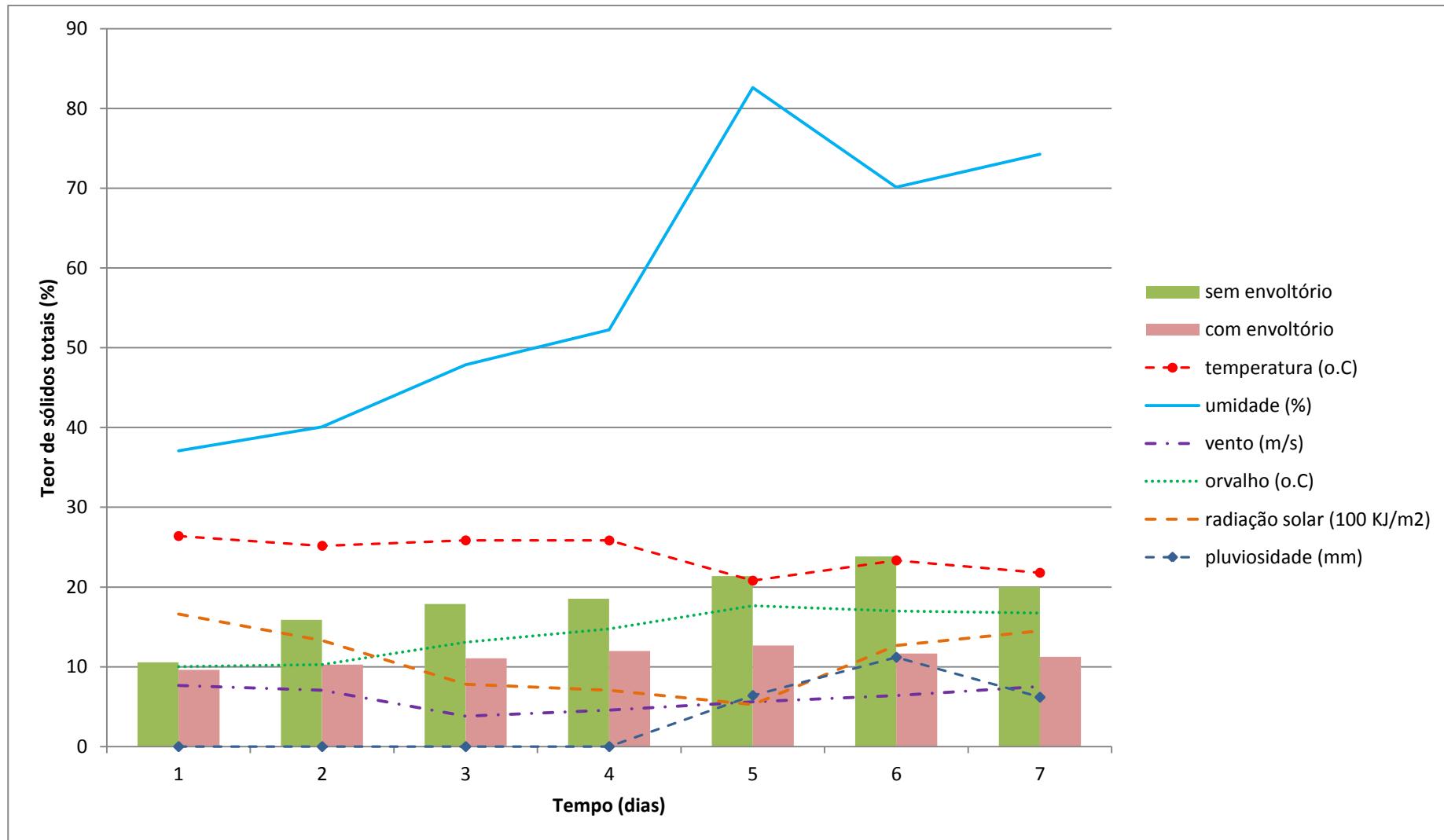
Fonte: Autor

Figura 16 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-26, submetida à TAS = 3,5 kg.m⁻², com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.



Fonte: Autor

Figura 17 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-31, submetida à TAS = 3,5 kg.m⁻², com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.



Fonte: Autor

Conforme as Figuras 15, 16 e 17 os valores de teor de sólidos diários, do lodo retido nos sistemas com e sem envoltório, são correlacionados com as variáveis climáticas. Os LD compostos pelos geotêxteis RT-21, RT-26 e RT-31 foram submetidos ao desaguamento no mesmo período, sendo assim foram submetidos às mesmas variações climáticas.

As Figuras 15, 16 e 17 demonstram que houve chuva no quinto, sexto e sétimo dias e que todas as mantas com envoltórios apresentaram redução no teor de sólidos diários quanto maior forem os valores do volume de chuva. Apesar da pluviosidade, nestes dias, os LD sem envoltórios apresentaram valores do teor de sólidos diários, cerca de 5,9 % maiores, quando comparados aos valores diários do teor de sólidos dos LD com envoltório (com valor mínimo de diferença de teor de sólidos diário de 0,5 % e máximo de 20,9 %). Confirmando os resultados encontrados por Fontana (2004) e Barroso (2007), os quais destacam que a umidade relativa do ar dificulta o processo de desidratação do lodo.

No sexto dia (Figuras 15, 16 e 17) houve redução do teor de sólidos do lodo retido nos três geotêxteis avaliados na composição do sistema de LD com envoltório, mas não houve redução do teor de sólidos do lodo nos LD sem o envoltório. A manutenção ou não redução do teor de sólidos do lodo retido no LD sem o envoltório se deve a pluviosidade do quinto dia que quando avaliada por hora foi distribuída ao longo do dia em pequenos volumes, o que possibilitou a ação desidratante dos outros agentes climáticos como: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), vento (m.s^{-1}) e radiação solar (100 kJ.m^{-2}). O Apêndice 2 apresenta os valores das variáveis climáticas as quais o lodo foi submetido no quinto dia deste ensaio. Variáveis como temperatura, vento e radiação solar contribuíram com a desidratação do lodo exposto, o que não aconteceu com o lodo dos LD isolados pelo envoltório.

Já no sétimo dia houve redução do teor de sólidos devido ao efeito cumulativo da ação da umidade relativa do ar que permaneceu acima de 70 % a partir do quinto dia e da concentração de maiores volumes de chuva num único momento. O Apêndice 3 apresenta os valores das variáveis climáticas, as quais o lodo foi submetido no sexto dia deste ensaio.

Os ventos durante essa semana se mantiveram em valores próximos de 5 m.s^{-1} . Como observado no Ensaio I à ação dos ventos é de fundamental importância ao processo de desidratação do lodo, os quais quando não atuam sobre o sistema prejudicam significativamente o processo de desidratação, pois, com a ausência da troca de ar não é possível haver a perda de umidade do lodo para o ar atmosférico.

A análise das Figuras 15, 16 e 17 demonstram que os valores de umidade foram altos, durante a semana avaliada (variou de 40 a 80 %), o que dificultou o processo de

desidratação do lodo. Apesar da ação das outras variáveis climáticas os elevados índices de umidade desaceleraram o processo de transferência da água do lodo para o meio (ar atmosférico). No entanto, a ação de uma variável climática sozinha como o vento ou a umidade relativa do ar não são suficientes, para o bom desempenho do processo de desidratação, o que destaca a ação conjunta e complementar das variáveis climáticas no processo de desidratação.

5.2.3 Ensaio III

As análises relativas ao Ensaio III foram realizadas com as mantas selecionadas na seção 5.1.2, ou seja, mantas RT-21, RT-26 e RT-31, da marca BIDIM, as quais após disposição sobre o sistema de LD foram submetidas à TAS de $7,0 \text{ kg.m}^{-2}$. Como o lodo avaliado apresentou $17,1 \text{ g.L}^{-1}$ de sólidos e a base do LD tinha área de $0,017 \text{ m}^2$ foram necessários 7,2 L de lodo.

5.2.3.1 Avaliação do desempenho dos Leitos de Drenagem - Fase de drenagem

5.2.3.1.1 Avaliação do desempenho geral da fase de drenagem

Os resultados referentes à análise do tempo de drenagem dos sistemas de LD demonstram que o tempo de drenagem foi de 48 h, período de tempo necessário para que não houvesse lâmina de água sobre o lodo retido no sistema, parâmetro adotado por Silveira et. al. (2011). As Tabelas 12, 13 e 14 apresentam os resultados obtidos neste ensaio para a vazão, volume drenado e volume drenado acumulado para as mantas geotêxteis RT-21, RT-26 e RT-31, respectivamente.

Tabela 12 - Dados referentes ao perfil de drenagem do lodo da ETA Bom Jardim, quando submetido ao desaguamento por LD constituído pela manta RT-21.

<i>Tempo (min.)</i>	<i>Vazão (mL.min⁻¹)</i>	<i>Volume Drenado (mL)</i>	<i>Volume drenado acumulado (%)</i>
15	35,0	520	7,2
30	6,3	190	9,9
45	3,1	140	11,8
60	1,8	110	13,3
90	2,0	180	15,8
120	1,2	145	17,8
180	1,2	210	20,8
240	0,7	180	23,3
300	0,7	220	26,3
390	0,3	120	28,0
480	0,3	160	30,2
570	0,2	140	32,2
1440	0,7	1.028	46,4
2880	0,4	1.168	62,7

Fonte: Autor**Tabela 13 - Dados referentes ao perfil de drenagem do lodo da ETA Bom Jardim, quando submetido ao desaguamento por LD constituído pela manta RT-26.**

<i>Tempo (min.)</i>	<i>Vazão (mL.min⁻¹)</i>	<i>Volume Drenado (mL)</i>	<i>Volume drenado acumulado (%)</i>
15	51	760	10,6
30	6,7	200	13,3
45	3,1	140	15,3
60	2,0	120	16,9
90	2,0	180	19,4
120	1,2	140	21,4
180	1,2	220	24,4
240	0,75	180	26,9
300	0,7	210	29,9
390	0,5	180	32,4
480	0,5	260	36,0
570	0,3	190	38,6
1440	0,7	1.000	52,5
2880	0,1	1.177	68,8

Fonte: Autor

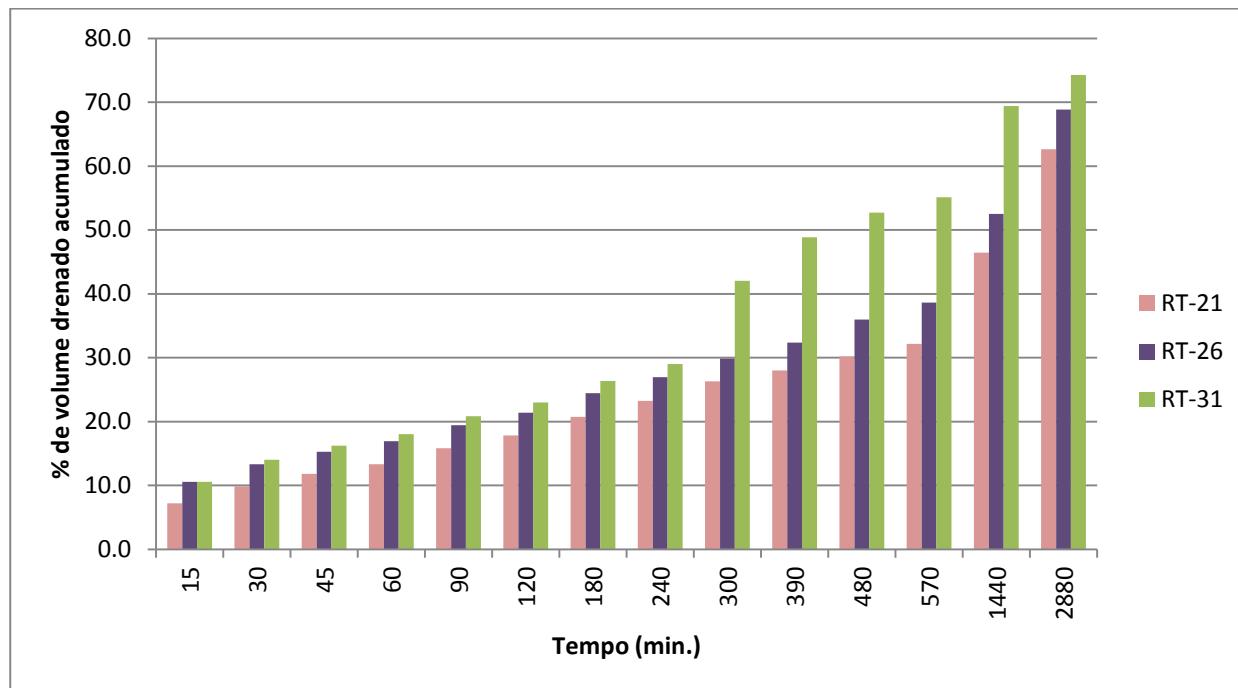
Tabela 14 - Dados referentes ao perfil de drenagem do lodo da ETA Bom Jardim, quando submetido ao desaguamento por LD constituído pela manta RT-31.

<i>Tempo (min.)</i>	<i>Vazão (mL.min⁻¹)</i>	<i>Volume Drenado (mL)</i>	<i>Volume drenado acumulado (%)</i>
15	51	760	10,6
30	8,3	250	14,0
45	3,6	160	16,3
60	2,1	130	18,1
90	2,2	200	20,8
120	1,3	157	23,0
180	1,3	20	26,3
240	0,8	190	29,0
300	3,1	940	42,0
390	1,3	490	48,8
480	0,6	280	52,7
570	0,3	170	55,1
1440	0,7	1030	52,5
2880	0,1	350	74,3

Fonte: Autor

As Tabelas 12, 13 e 14 referem-se à avaliação da vazão, variação do volume do drenado de água livre ao longo do tempo e volume de drenado de água livre acumulado ao longo do tempo. Como citado anteriormente segundo Barroso (2007) o final da etapa de drenagem é determinado pela vazão de $1,67 \text{ mL}.\text{min}^{-1}$ ou pelo cessar da drenagem de água livre, por meio destas tabelas foi possível observar que valores de vazão menores que $1,67 \text{ mL}.\text{min}^{-1}$ ainda drenam grandes volumes de drenado e por isso foi considerado como o final da fase de drenagem o instante em que não houvesse lámina de água no lodo retido no LD, conforme Silveira (2011).

Figura 18 - Volume de água livre drenada nos Leitos de Drenagem compostos pelas manta RT-21, RT-26 e RT-31, a TAS = 7,0 kg.m⁻².



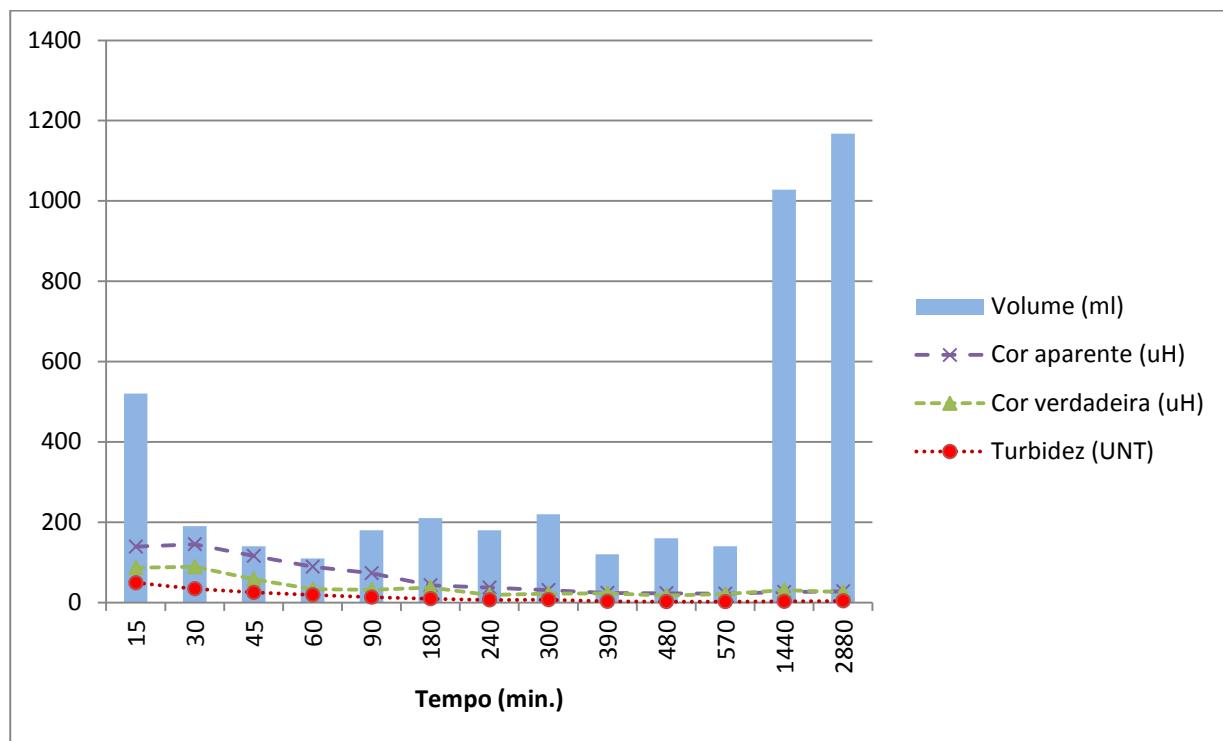
Fonte: Autor

A Figura 18 demonstra que ao final da fase de drenagem a manta RT-31 apresentou um maior volume de drenado, diferente do observado para as TAS de 1,75 e 3,5 kg.m⁻². O que segundo Barroso (2007) se deve a variação dos valores da TAS e do pH, que podem interferir na capacidade drenante do geotêxtil.

5.2.3.1.2 Avaliação do desempenho parcial da fase de drenagem

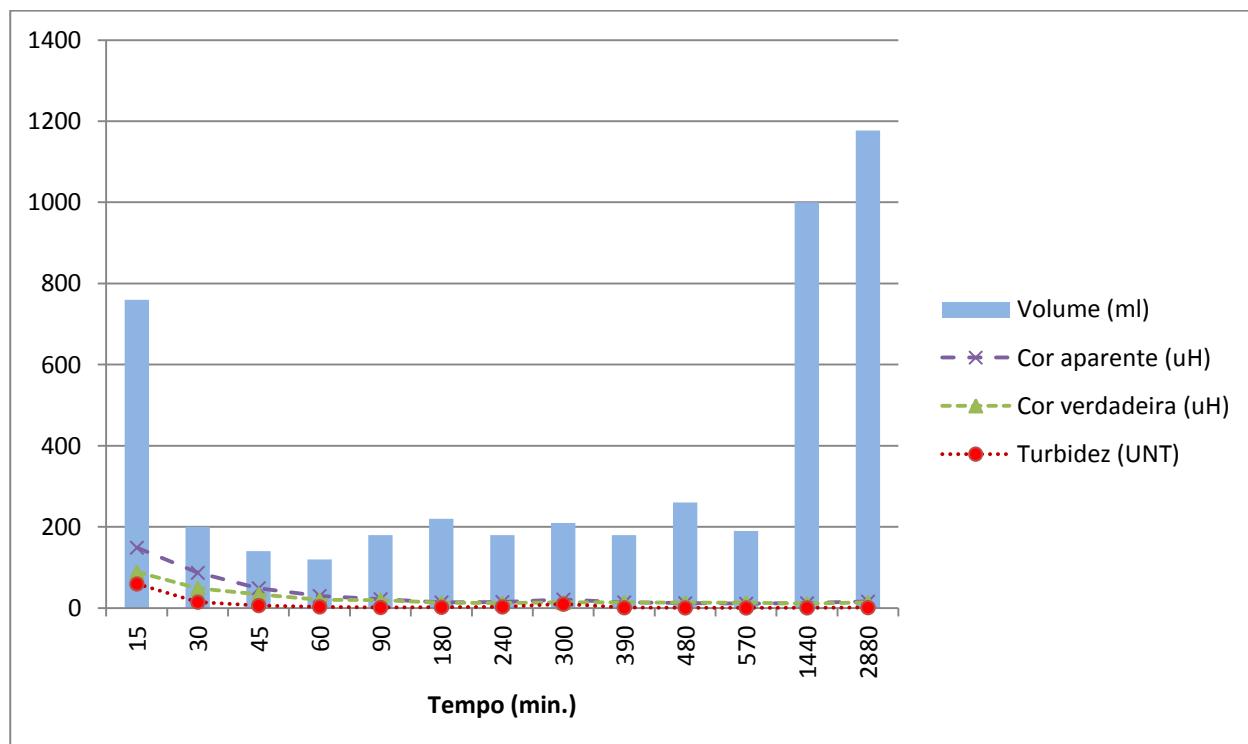
As análises para avaliação do drenado foram conduzidas em amostras coletadas em intervalos de tempo pré-fixados. As Figuras 19, 20 e 21 representam os resultados obtidos para tempos de coleta de 15, 30, 45, 60, 90 e 180, 240, 300, 390, 480, 570, 1.440 e 2.880 minutos, diferente dos ensaios anteriores devido as diferentes TAS e consequente diferença do tempo de drenagem total. A distribuição do volume de drenado ao longo do tempo é semelhante aos anteriores, quanto maior o intervalo de tempo de drenagem maior o volume do drenado de água livre.

Figura 19 - Dados de volume, turbidez, cor verdadeira e cor aparente ao longo do tempo de drenagem da manta RT-21 submetida à TAS = 7,0 kg.m⁻².



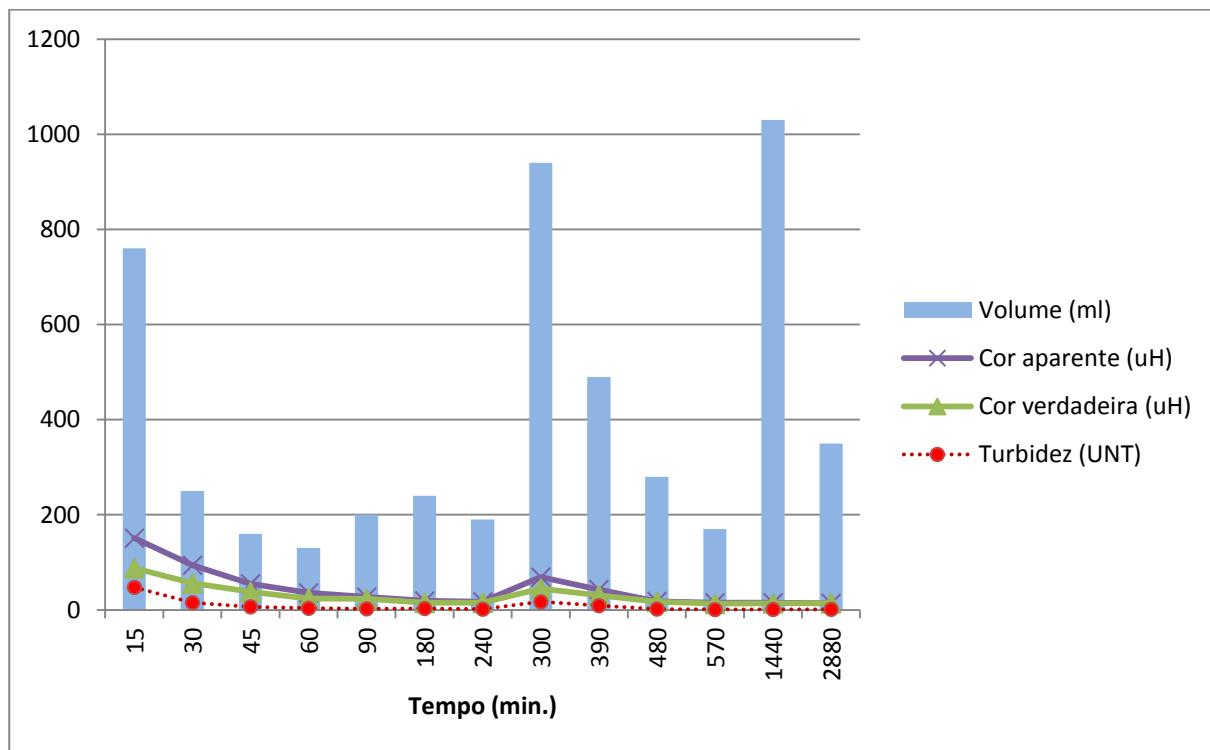
Fonte: Autor

Figura 20 - Dados de volume, turbidez, cor verdadeira e cor aparente ao longo do tempo de drenagem da manta RT-26 submetida à TAS = 7,0 kg.m⁻².



Fonte: Autor

Figura 21 - Dados de volume, turbidez, cor verdadeira e cor aparente ao longo do tempo de drenagem da manta RT-31 submetida à TAS = 7,0 kg.m⁻².



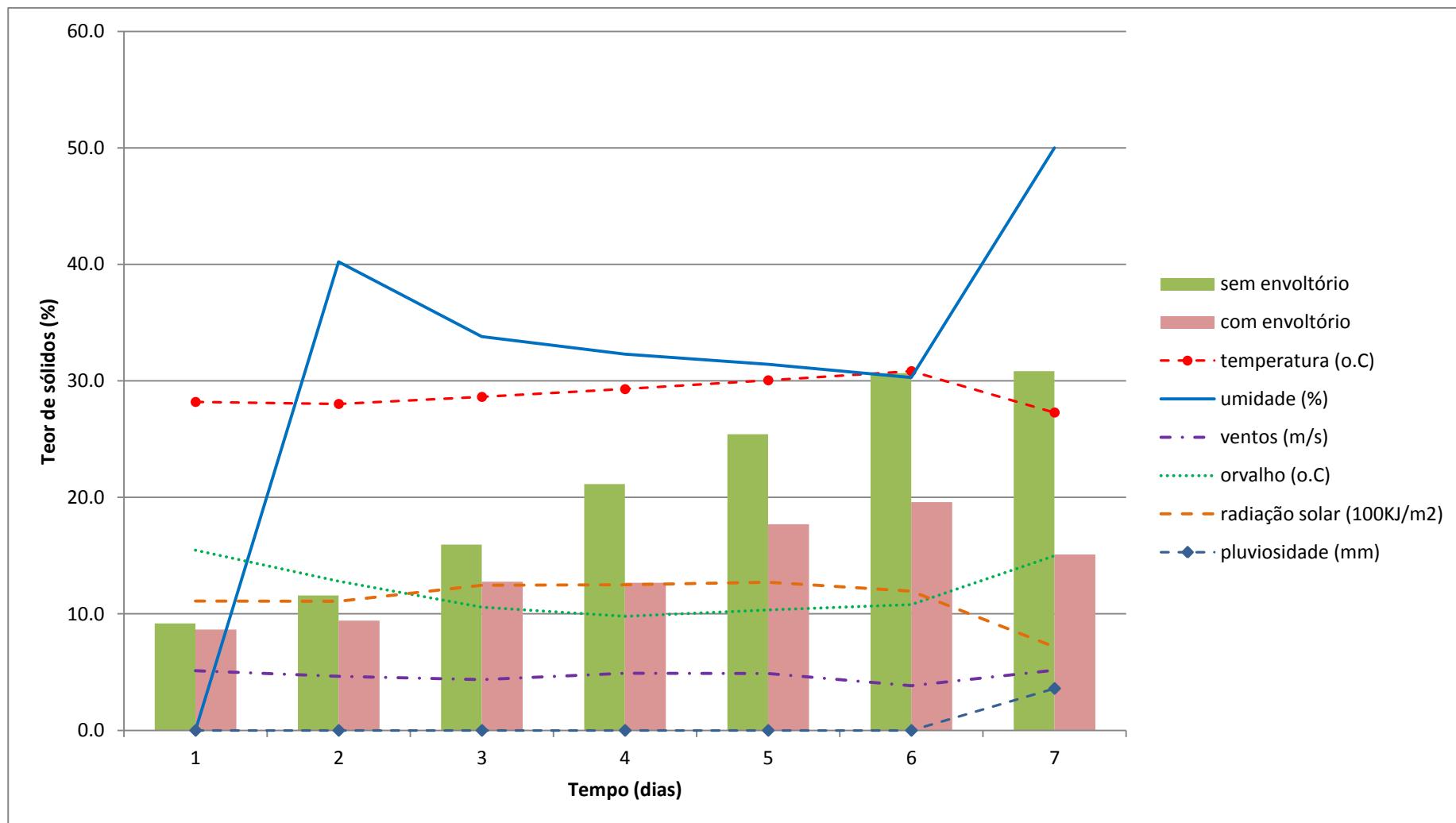
Fonte: Autor

Os resultados referentes à cor aparente, cor verdadeira e turbidez ao longo do tempo apresentaram curvas com comportamento semelhante aos ensaios anteriores, com valores elevados para o drenado de água livre, dos três geotêxteis, nos primeiros 15 minutos (Figuras 19, 20 e 21). Valores estes de cor aparente 269, 221 e 248 uH, cor verdadeira 190, 182 e 181 uH, turbidez 101, 83 e 93 UNT, respectivamente para os geotêxteis RT-21, RT-26 e RT-31. Os resultados demonstram também que a partir de 15 minutos há uma redução significativa, aproximadamente 57,7 % (média aritmética), dos valores de turbidez nas mantas RT-21, RT-26 e RT-31, redução essa menor que os valores encontrados para os ensaios anteriores, o que demonstra a interferência da TAS. Essa diferença pode ser justificada pela maior retenção de partículas sólidas nos poros, e quanto maiores os valores da TAS menor a diferença da turbidez entre os 15 e 30 minutos de drenado coletado.

5.2.3.2 Avaliação do desempenho dos Leitos de Drenagem - Fase de secagem

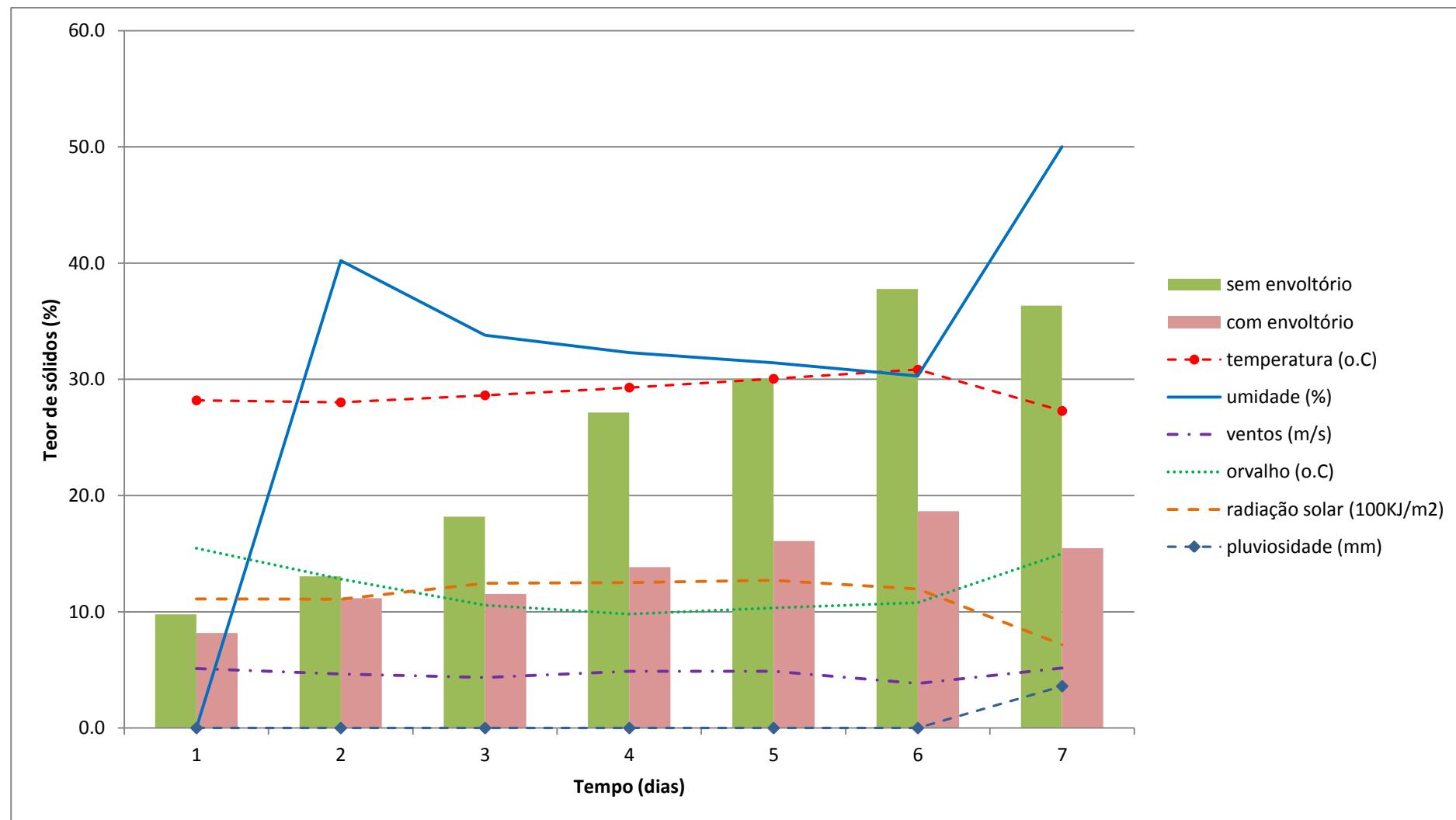
Para a obtenção destes resultados foram realizados os mesmos procedimentos descritos anteriormente nas seções 5.2.1.2 e 5.2.2.2, no entanto os sistemas de LD receberam lodo a uma TAS = 7,0 kg.m⁻². As Figuras 22, 23 e 24 apresentam os resultados obtidos para teor de sólidos e variáveis climáticas dos sistemas de LD compostos, respectivamente, pelas mantas geotêxteis RT-21, RT-26 e RT-31.

Figura 22 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-21, submetida à TAS = 7,0 kg.m⁻², com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.



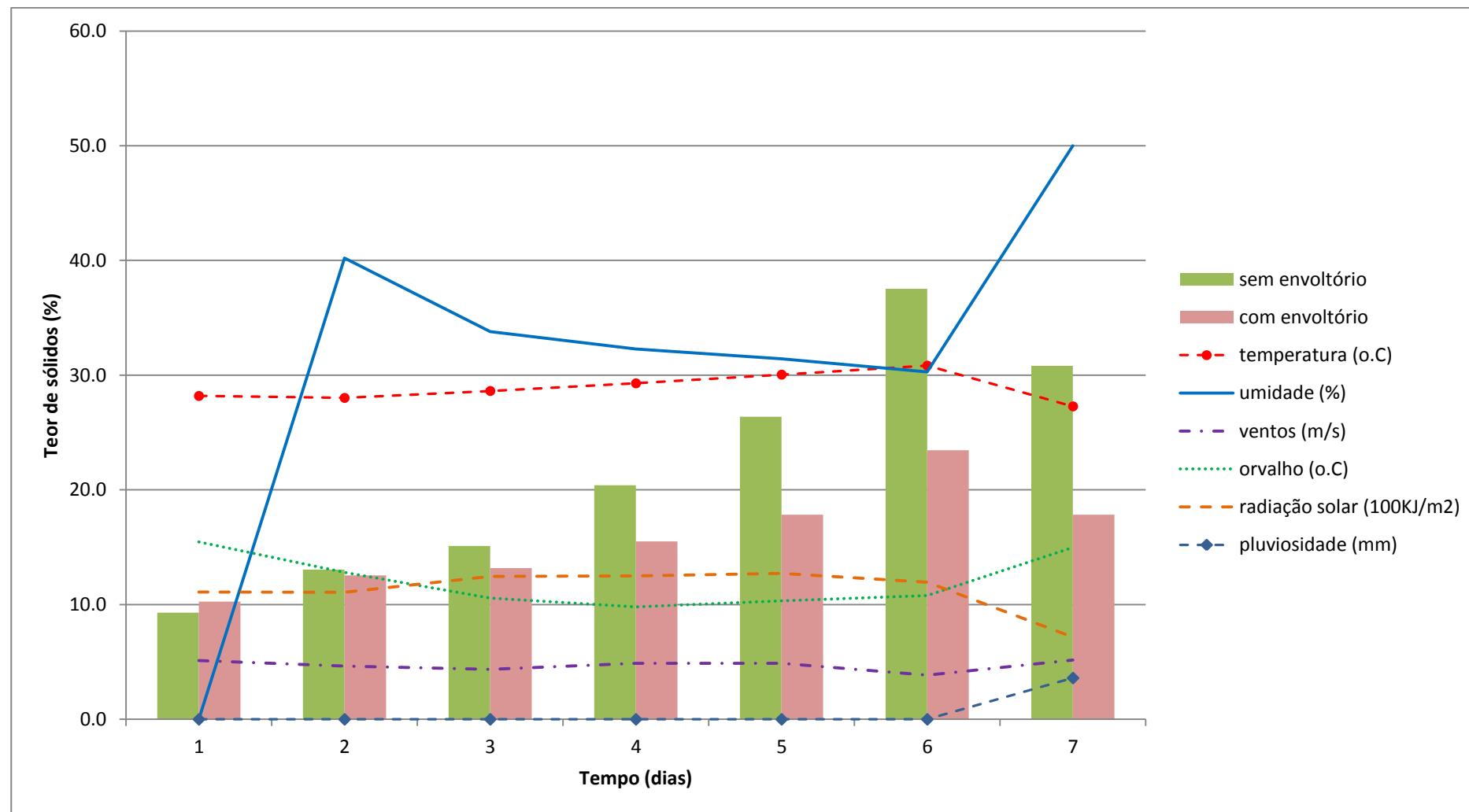
Fonte: Autor

Figura 23 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-26, submetida à TAS = 7,0 kg.m⁻², com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.



Fonte: Autor

Figura 24 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-31, submetida à TAS = 7,0 kg.m⁻², com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.



Fonte: Autor

As Figuras 22, 23 e 24 apresentam a correlação dos valores diários de teor de sólidos, do lodo retido nos sistemas com e sem envoltório, com as variáveis climáticas. Os LD compostos pelos geotêxteis RT-21, RT-26 e RT-31 foram submetidos ao desaguamento no mesmo período, sendo assim foram submetidos às mesmas variações climáticas.

A análise das Figuras 22, 23 e 24 demonstram que os valores de umidade foram inferiores a 50 % durante toda a semana avaliada, o que acelerou o processo de desidratação do lodo, quando comparado aos resultados referentes ao tempo de secagem do lodo aplicado a $TAS = 3,5 \text{ kg.m}^{-2}$, sendo que a semana deste último apresentou índices de umidade relativa do ar próximos nos três primeiros dias e superiores a 50 % nos quatro últimos dias, o que dificultou a transferência de água do lodo para o ar atmosférico.

A ação conjunta de variáveis como a radiação solar (cerca de $12.10^2 \text{ kJ.m}^{-2}$), temperatura (variou em torno de 28°C) e ventos (velocidade variou em torno de 5 m.s^{-1}) contribuíram com a redução do teor de sólidos em ambos os sistemas com e sem envoltório. Considerando que a diferença do teor de sólidos diários entre os LD com e sem envoltório se deve ao isolamento parcial da ação das variáveis climáticas no LD com envoltório, com relação aos ventos o isolamento foi total, isolamento que provocou menores valores do teor de sólidos diários deste sistema de LD com envoltório.

No sétimo dia (Figuras 22, 23 e 24) houve redução do teor de sólidos diários do lodo retido nos sistema de LD com envoltório e sem envoltório em razão do período de chuva se estender das 17:00 h do dia anterior até as 7:00 h do dia da coleta, sendo que a coleta acontecia por volta das 9:00 h, conforme Apêndice 4. Os resultados referentes ao teor de sólidos diários dos LD sem envoltório foi 8,0 % maior (valor mínimo da diferença de teor de sólido foi de 0,5 % e o máximo de 19,1 %) que os valores do LD com envoltório.

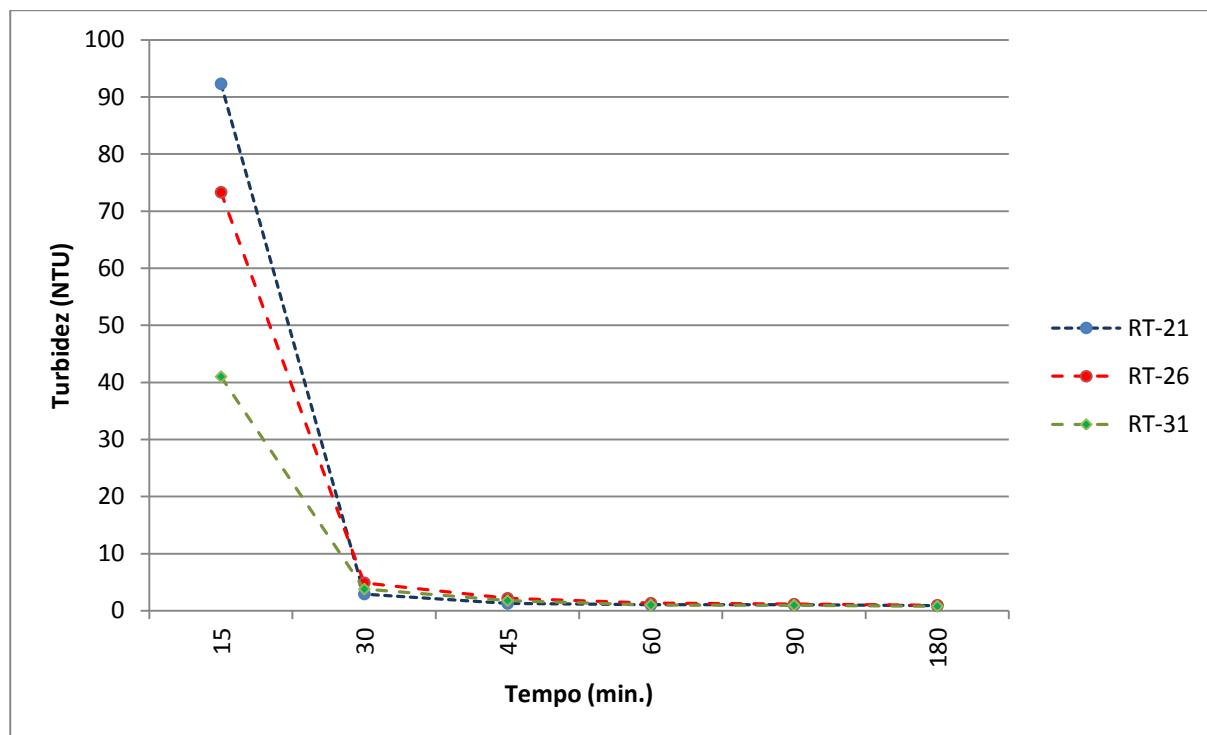
5.2.4 Comparação resultados dos ensaios I, II e III

5.2.4.1 Avaliação comparativa entre as mantas para uma mesma TAS – Fase de drenagem

As figuras 25, 26 e 27 comparam o desempenho das mantas RT-21, RT-26 e RT-31 para uma mesma TAS por meio dos valores de turbidez dos drenados oriundos destas, de

forma a entender como melhor desempenho os geotêxteis que fornecem drenados com menores valores de turbidez.

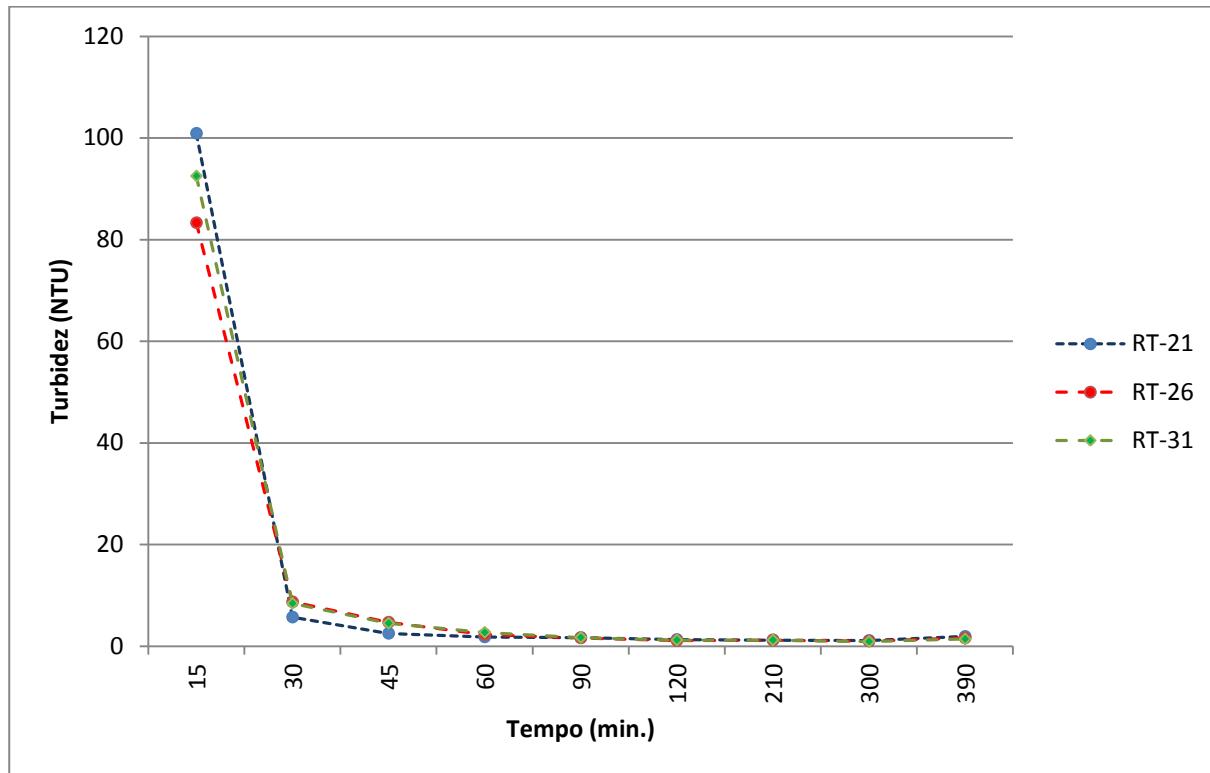
Figura 25 – Dados comparativos entre as mantas geotêxteis RT-21, RT-26 e RT-31 submetidos a TAS = 1,75 kg.m⁻² ao longo do tempo.



Fonte: Autor

É possível observar que o drenado do LD constituído pelo geotêxtil RT-31 apresenta menor turbidez nos 15 primeiros minutos quando recebe lodo a TAS = 1,75 kg.m⁻², e o comportamento da curva restante foi semelhante as dos outros geotêxteis, RT-26 e RT-21. A turbidez é menor para o drenado do LD constituído pelo geotêxtil RT-31 em razão da menor permissividade e abertura aparente (O_{95}), conforme relatado na Tabela 6, da seção 5.1.2, o que justifica os valores da turbidez encontrados para os drenados dos outros geotêxteis,

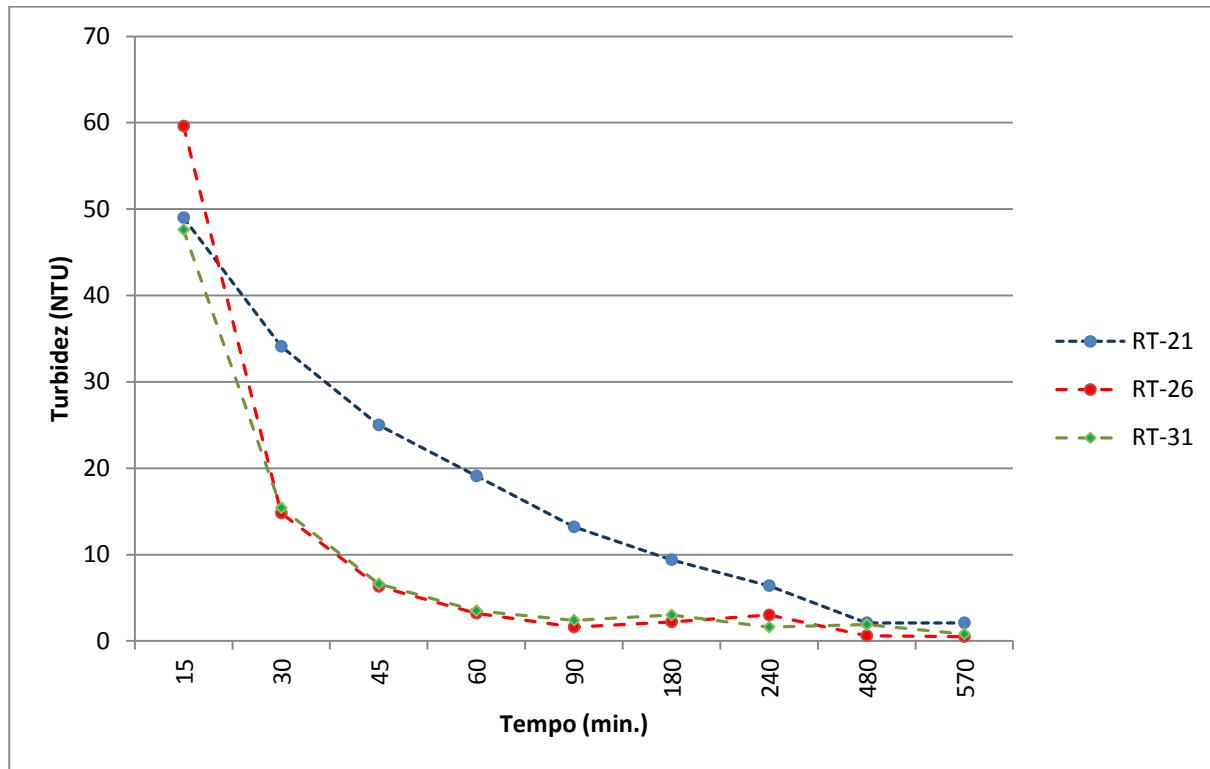
Figura 26 - Dados comparativos entre as mantas geotêxteis RT-21, RT-26 e RT-31 submetidos a TAS = 3,5 kg.m⁻² ao longo do tempo.



Fonte: Autor

Quando avaliados os drenados dos LD constituídos pelos geotêxteis RT-21, RT-26 e RT-31, submetidas a TAS de 3,5 kg.m⁻² de lodo, o comportamento das três curvas é muito semelhante, com diferença também apenas nos primeiros 15 minutos, respectivamente, de 101, 83 e 93. Sendo o drenado da manta RT-26 o que apresentou menor valor de turbidez, nos primeiros 15 minutos. O comportamento das curvas de turbidez dos drenados submetidos a TAS de 3,5 kg.m⁻² foi diferente das curvas encontradas para as mesmas mantas submetidas a TAS de 1,75 kg.m⁻², segundo Barroso (2007) isso se deve a diferentes TAS, as quais podem alterar o comportamento drenante do geotêxtil

Figura 27 - Dados comparativos entre as mantas geotêxteis RT-21, RT-26 e RT-31 submetidos a TAS = 7,0 kg.m⁻² ao longo do tempo.



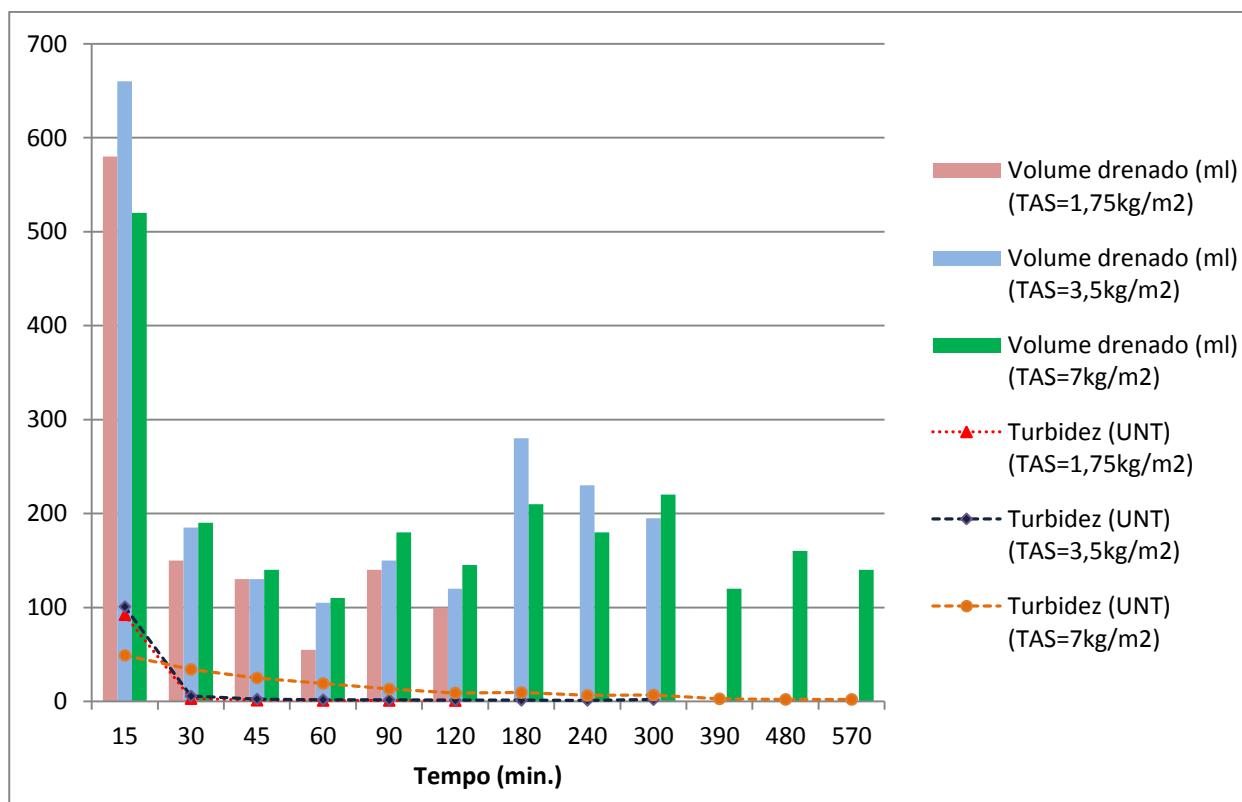
Fonte: Autor

Quando avaliados as diferentes mantas geotêxteis submetidas a uma mesma TAS de 7,0 kg.m⁻² foi possível observar que houve diferenças significativas quanto ao comportamento das curvas dos drenados dos LD constituídos pelas mesmas mantas avaliadas anteriormente. Essa TAS destacou a facilidade de passagem do lodo pelo geotêxtil RT-21 que apresenta maiores valores para propriedades hidráulicas como permissividade e abertura aparente (O_{95}), quando comparado aos outros geotêxteis. As mantas geotêxteis RT-26 e RT-31 apresentaram curvas com comportamentos semelhantes.

5.2.4.2 Avaliação comparativa entre as TAS para uma mesma manta - Fase de drenagem

É possível observar nas Figuras 28, 29 e 30 os dados referentes à comparação entre a turbidez e o volume de drenado resultante de diferentes TAS, aplicadas sobre uma mesma composição do sistema de LD. As Figuras também demonstram a diferença da duração da fase de drenagem a diferentes TAS, variáveis estas proporcionais, ou seja, maior a TAS, maior a duração da fase de drenagem.

Figura 28 - Dados comparativos entre as TAS de $1,75 \text{ kg.m}^{-2}$, $3,5 \text{ kg.m}^{-2}$ e $7,0 \text{ kg.m}^{-2}$ para a manta RT-21.

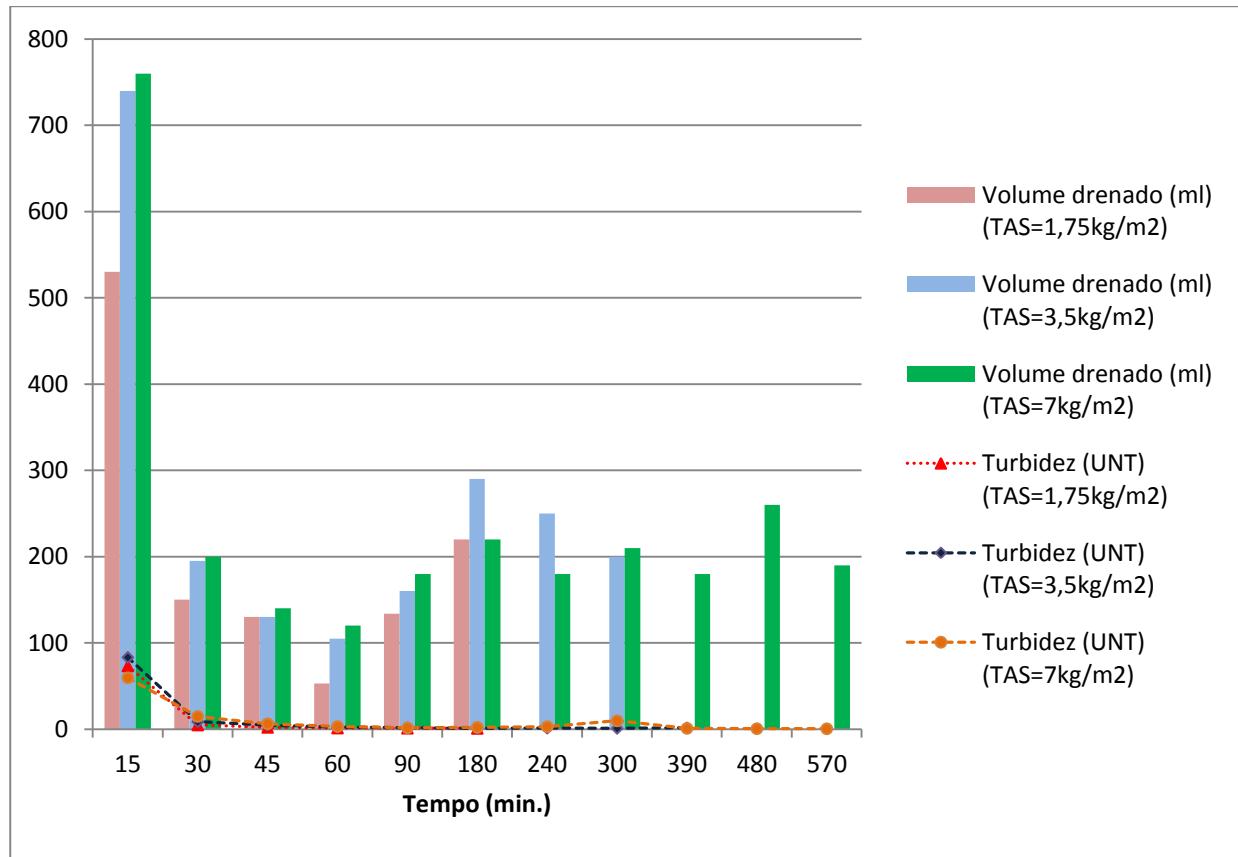


Fonte: Autor

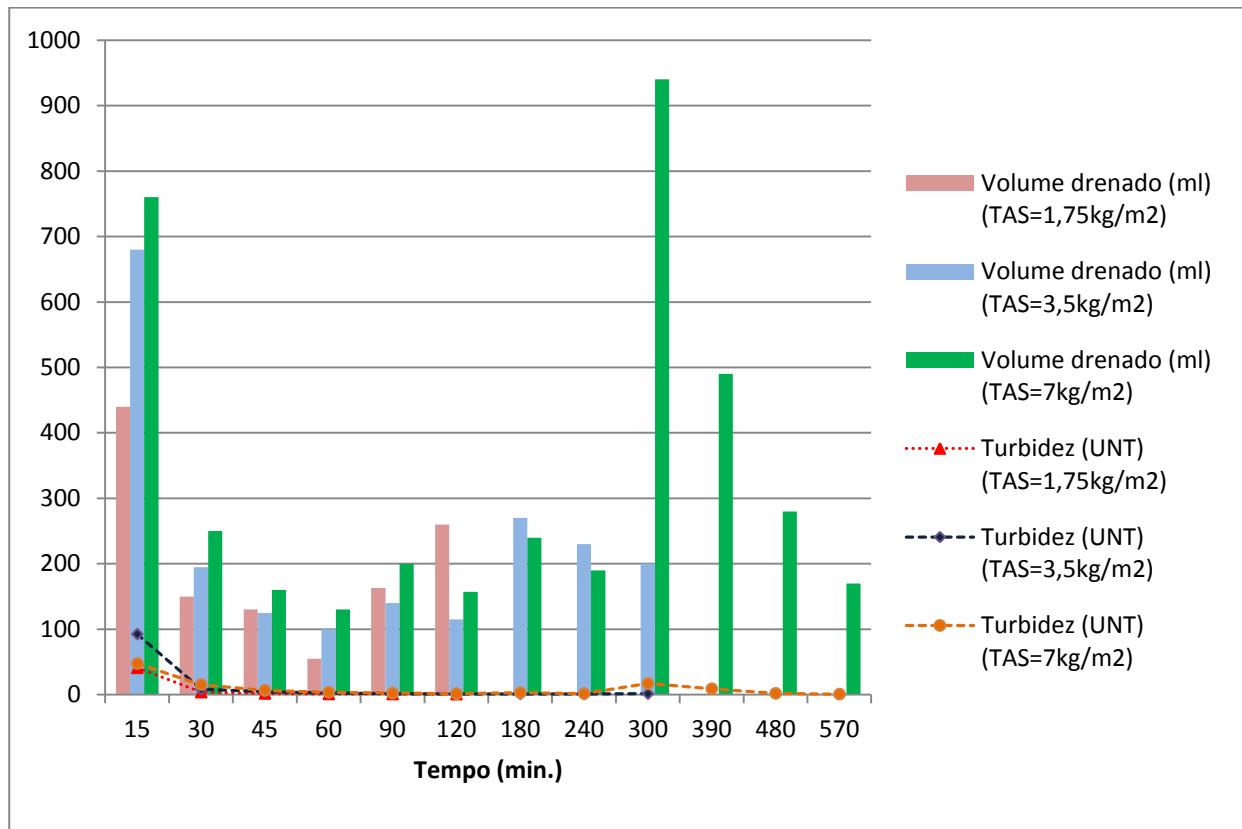
A Figura 28 referente à aplicação das diferentes TAS sobre o LD composto pelo geotêxtil RT-21, retrata a semelhança entre o comportamento das curvas de turbidez do drenado. Destaca também a diferença quanto a turbidez do drenado obtido pela TAS de $7,0 \text{ kg.m}^{-2}$, diferença esta observada somente na manta RT-21, em razão dos maiores valores de abertura aparente (O_{95}) e permissividade, propriedades hidráulicas do geotêxtil que favorecem a passagem de sólidos de diâmetros maiores, os quais estão em maior volume nas maiores

TAS e consequentemente causam uma maior obstrução dos poros do geotêxtil. Isso dificulta a passagem da água livre e a que passa é mais clarificada.

Figura 29 - Dados comparativos entre as TAS de $1,75 \text{ kg.m}^{-2}$, $3,5 \text{ kg.m}^{-2}$ e $7,0 \text{ kg.m}^{-2}$ para a manta RT-26.



Fonte: Autor

Figura 30 - Dados comparativos entre as TAS de 1,75 kg.m⁻², 3,5 kg.m⁻² e 7,0 kg.m⁻² para a manta RT-31.

Fonte: Autor

Quando comparadas as diferentes TAS sobre o desempenho dos geotêxteis, há indicações de pouca interferência no comportamento das curvas de turbidez do drenado, com exceção da duração do tempo de drenagem que é maior para maiores valores de TAS.

5.2.4.3 Avaliação comparativa entre as mantas para uma mesma TAS e entre as TAS para uma mesma manta – Fase de secagem

Na fase de secagem foram observadas diferenças significativas quanto a desidratação nas diferentes mantas geotêxteis quando submetidas a uma mesma TAS. Mas foram observadas diferenças de teor de sólidos diários do lodo entre as diferentes TAS para uma mesma manta, em que menores TAS são mais favoráveis à desidratação do lodo. Diferenças essas que não podem ser consideradas conclusivas, pois o contexto climático a que os sistemas foram submetidos não foram os mesmos.

No entanto, segundo Mortara (2011) o lodo em contato com as superfícies laterais do sistema de LD tem maior facilidade de desidratação, o que podemos justificar pela transferência de calor do material sólido, parede do sistema de LD, para o lodo. A transferência de calor do ar atmosférico (gás) é menor que a transferência de calor do material de constituição do LD (sólido) para o lodo.

A transferência de calor do ambiente para o lodo acontece por condução, convecção e radiação. Formas essas descritas anteriormente, as quais dependem da área superficial para a transferência de calor do ar atmosférico para o lodo e a transferência de calor do material constituinte do sistema para o lodo depende da altura do lodo no sistema. Logo, quanto maior a TAS, maior será a camada de lodo retido na manta e consequentemente maior o tempo necessário para a desidratação do lodo. E menores valores de TAS exigem uma maior área para a implantação do sistema de LD, o que também dificulta o processo de desidratação do lodo e é economicamente desfavorável em razão da necessidade de maiores áreas territorial.

A diferença do teor de sólidos diários entre os sistemas LD com e sem envoltório, destaca a importância da ação dos ventos no processo de secagem, visto que diante do isolamento total do lodo retido no sistema de LD pelo envoltório, o processo de desidratação é dificultado. Foi destacado também a importância do contexto climático favorável a desidratação, sendo de fundamental importância a ação conjunta e complementar das variáveis climáticas no processo de secagem do lodo.

5.2.5 Ensaio IV

Para o desenvolvimento deste ensaio, foram consideradas as análises comparativas da seção 5.2.4, a partir da qual foi selecionado o geotêxtil RT-31 e a TAS de 3,5 kg.m⁻². Os Leitos de Drenagem compostos pelo geotêxtil RT-31 apresentaram drenados com menores valores de turbidez quando comparados com os outros. A TAS de 3,5 kg.m⁻² foi selecionada considerando a intermediação da necessidade de menores espaços territoriais para a implantação do sistema e da fase de secagem que é mais rápida para menores TAS, justificado pela transferência de calor.

O lodo utilizado para o desenvolvimento deste ensaio foi submetido ao desaguamento pelo sistema de LD no mesmo dia da coleta, o que não foi possível de ser realizado nos ensaios anteriores, tendo em vista o desencontro temporal da data de limpeza dos decantadores e montagem das instalações dos sistemas de LD. Além disso, diante dos resultados encontrados para os Ensaios I, II e III em que os primeiros 15 minutos de drenado coletados apresentaram maiores valores de turbidez, neste ensaio foi avaliado se o descarte dos primeiros 15 minutos do drenado possibilitaria a recirculação direta do drenado restante no sistema de tratamento de água na etapa de filtração. No caso de o drenado não se adequar aos parâmetros estabelecidos pela Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde (2011), foi avaliado a possibilidade do lançamento do mesmo sem descarte direto no corpo hídrico de acordo com os parâmetros estabelecidos pela resolução CONAMA 430 (2011) e pela COPAM/CERH-MG (2008).

5.2.5.1 Avaliação do desempenho geral dos Leitos de Drenagem - Fase de drenagem

A Tabela 15 apresenta os valores encontrados para as micropropriedades do lodo e dos drenados com e sem o descarte dos primeiros 15 minutos de drenagem.

Tabela 15 - Micropropriedades do lodo e da água livre drenada pelo LD (Ensaio VI), com e sem descarte dos primeiros 15 min. De drenagem.

Parâmetros	Unidade	Lodo decantador ETA	Drenado de LD	Drenado de LD descarte
		Bom Jardim		15 min.
pH	-	6,4	5,97	5,57
Cor aparente	uH	N/D	6	5
Turbidez	UNT	N/D	0,97	0,53
Sólidos totais	mg.L ⁻¹	17.200	240	208
Fe	mg.L ⁻¹	47.212	0,8352	0,6052
Mn	mg.L ⁻¹	726 ⁺	2,73	2,66
Al	mg.L ⁻¹	86.076 ⁺	0,1648	0,0780
Cd	mg.L ⁻¹	< 0,1 ⁺	<0,001	<0,001
Cr	mg.L ⁻¹	89 ⁺	<0,001	<0,001
Pb	mg.L ⁻¹	7,0 ⁺	<0,001	<0,001
DQO	mg.L ⁻¹ O ₂	5.060	31	26
DBO	mg.L ⁻¹ O ₂	1.647	13	7,3

(*): dissolvidos

(N/D): Não Determinado

(**): suspensão

(⁺): mg..kg⁻¹

(***) hexavalente

Conforme observado na Tabela 15 foi possível confirmar a eficiência e o desempenho do sistema de LD para a remoção de água do lodo. Todos os parâmetros avaliados apresentaram elevada redução das respectivas concentrações no drenado, confirmando resultados encontrados por Fontana (2004), Barroso (2007) e Mendonça et al. (2004) para valores de DQO. Logo, foram avaliadas as possibilidades de recirculação no sistema de tratamento de água na fase de filtração ou descarte direto do drenado no corpo hídrico. Os parâmetros ideais para essas disposições finais são estabelecidos pela Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde (2011) para definição da água potável (Tabela 16) e as normas estabelecidas pela resolução CONAMA 430 (2011) e pela COPAM/CERH-MG (2008) para o descarte de efluentes diretamente nos cursos de água (Tabela 17).

A Tabela 16 apresenta os valores encontrados para as micropropriedades dos drenados com e sem o descarte dos primeiros 15 minutos de drenagem e os valores estabelecidos pela Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde (2011) para qualificação da água como potável, o que possibilitaria a recirculação do drenado no sistema de tratamento de água na etapa de desinfecção.

Tabela 16–Micropropriedades da água livre drenada pelo LD (Ensaio VI) e valores dos parâmetros estabelecidos para água potável segundo a Portaria nº 2.914 do MS (2011).

Parâmetros	Unidade	LQ	Drenado de	Drenado de LD	Portaria no 2.914 do
			LD	descarte 15 min.	MS (2011)
pH	-	-	5,97	5,57	6,0 - 9,5
Cor aparente	uH	-	6	5	15
Turbidez	UNT	-	0,97	0,53	0,5
Sólidos totais	mg.L ⁻¹	-	240	208	1.000*
Fe	mg.L ⁻¹	0,01	0,8352	0,6052	2,4
Mn	mg.L ⁻¹	0,02	2,73	2,66	0,4
Al	mg.L ⁻¹	0,001	0,1648	0,0780	0,2
Cd	mg.L ⁻¹	0,001	<0,001	<0,001	0,005
Cr	mg.L ⁻¹	0,001	<0,001	<0,001	0,05
Pb	mg.L ⁻¹	0,001	<0,001	<0,001	0,01
DQO	mg.L ⁻¹ O ₂	5	31	26	--
DBO	mg.L ⁻¹ O ₂	6	13	7,3	--

(MS): Ministério da Saúde

(**): suspensão

(LQ): Limite de Quantificação

(***) hexavalente

(*): dissolvidos

Logo, foi possível observar na Tabela 16 que o valor de turbidez foi baixo quando comparados à tendência do comportamento dos valores ao longo do tempo para o drenado do mesmo geotêxtil. Segundo Mortara (2011) isso provavelmente se deve ao tempo de armazenamento, que quanto maior favorece a desestabilização dos flocos constituintes do lodo. Flocos estes que se tornam mais fáceis de serem quebrados, o que consequentemente aumenta a turbidez do drenado. Mortara (2011) avaliou essas alterações na conformação dos flocos de lodo para lodo de ETE, que apesar de diferentes estão ambos propícios a alterações e perda de características ao longo do tempo, assim como Fontana (2004) observou que a alteração do pH do lodo ao longo do tempo de armazenamento, o que altera também a drenabilidade do geotêxtil. Apesar disso, foi possível observar também, na Tabela 16, que a tendência de maiores valores de turbidez para os primeiros 15 minutos de drenagem permanece, o que difere é a quantidade de sólidos que passam pelos poros, maior para o maior tempo de armazenamento.

Foi possível observar também que assim como é maior a turbidez do drenado nos 15 primeiros minutos de drenagem, são maiores também os valores da concentração de metais

como ferro, alumínio e manganês, além dos maiores valores de DQO e DBO. A Tabela 16 também demonstra que quando comparados os parâmetros determinados pela Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde (2011) com os valores encontrados pela análise do drenado, o mesmo não pode ser recirculado no sistema de tratamento de água apenas na etapa de filtração em função do valor elevado da concentração de manganês no drenado, valor de 2,66 mg.L⁻¹ enquanto o permitido pela portaria é 0,4 mg.L⁻¹ para que a água seja considerada potável.

Logo, a Tabela 17 apresenta os valores encontrados para as micropropriedades dos drenados com e sem o descarte dos primeiros 15 minutos de drenagem e os valores estabelecidos pela resolução CONAMA 430 (2011) e pela COPAM/CERH-MG (2008) para o descarte de efluentes diretamente nos cursos de água, outra possibilidade de destino final para o drenado.

Tabela 17 - Micropropriedades da água livre drenada pelo LD (Ensaio VI) e valores dos parâmetros estabelecidos para o descarte de efluentes diretamente nos cursos de água, resolução CONAMA 430 (2011) e pela COPAM/CERH-MG (2008).

Parâmetros	Unidade	LQ	Drenado de LD	Drenado de LD descarte 15 min.	CONAMA 430 (2011)	COPAM/CERH- MG (2008)
pH	-	-	5,97	5,57	5,0-9,0	6-9
Cor aparente	uH	-	6	5	75 ⁺	-
Turbidez	UNT	-	0,97	0,53	100	-
Sólidos totais	mg.L ⁻¹	-	240	208	500*	100**
Fe	mg.L ⁻¹	0,01	0,8352	0,6052	15,0**	15,0
Mn	mg.L ⁻¹	0,02	2,73	2,66	1,0*	1,0
Al	mg.L ⁻¹	0,001	0,1648	0,0780	0,1*	0,1
Cd	mg.L ⁻¹	0,001	<0,001	<0,001	0,2	0,1
Cr	mg.L ⁻¹	0,001	<0,001	<0,001	0,1***	0,5***
Pb	mg.L ⁻¹	0,001	<0,001	<0,001	0,5	0,1
DQO	mg.L ⁻¹ O ₂	5	31	26	--	180
DBO	mg.L ⁻¹ O ₂	6	13	7,3	5	60

(MS): Ministério da Saúde

(LQ): Limite de Quantificação

(*): dissolvidos

(**): suspensão

(***): hexavalente

(†): cor verdadeira

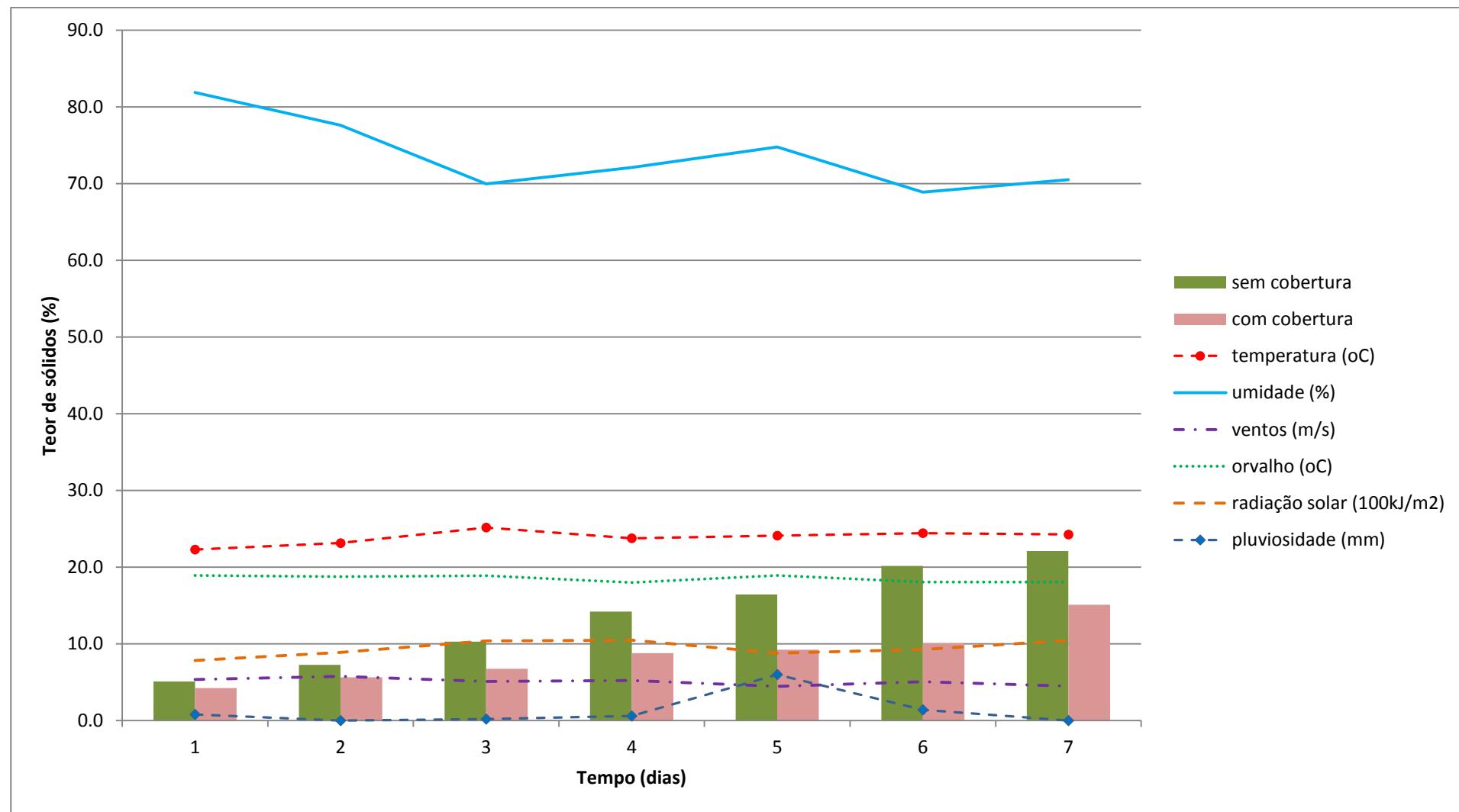
A análise da Tabela 17 destaca a possibilidade do descarte do drenado do sistema LD diretamente nos cursos de água, diante da adequação dos valores dos parâmetros

avaliados ao estabelecido pela resolução CONAMA 430 (2011) e pela COPAM/CERH-MG (2008). Considerando que os valores de sólidos totais do drenado são menores que o valor de sólidos dissolvidos estabelecidos pela resolução CONAMA 430 (2011) e maiores somente que o estabelecido pela COPAM/CERH-MG (2008) para sólidos suspensos. Logo, para a confirmação dessa possibilidade será necessário realizar uma avaliação mais completa do drenado.

5.2.5.2 Avaliação do desempenho geral dos Leitos de Drenagem - Fase de secagem

A Figura 31 apresenta a correlação dos resultados obtidos para teor de sólidos com os valores das variáveis climáticas as quais o sistema de LD, compostos pela manta geotêxtil RT-31 e submetido a TAS = 3,5 kg.m⁻², foi submetido, no período de sete dias.

Figura 31 - Dados de Teor de sólidos (%) retidos no LD constituído pela manta RT-31, submetida à TAS=7,0kg.m⁻², com e sem envoltório e as médias diárias das variáveis climáticas: temperatura, umidade, vento, orvalho, radiação solar e pluviosidade.



Fonte: Autor

A Figura 31 refere-se à análise do LD composto pelo geotêxtil RT-31 submetido a TAS de $3,5 \text{ kg.m}^{-2}$, definidos para o desenvolvimento do Ensaio IV. Foi possível observar que a temperatura apresentou pequenas variações em torno de 25°C e a radiação solar também se manteve próximo do valor de $10 \cdot 10^2 \text{ kJ.m}^{-2}$, variáveis estas que contribuíram com o aumento gradativo do teor de sólidos diários em ambos os sistemas de LD com e sem envoltório.

O índice de pluviosidade foi nulo apenas no segundo e no sétimo dia, e os outros dias tiveram pequenos volumes de chuva (apenas o quinto e o sexto dia apresentaram volumes de chuva maiores que 1 mm). A umidade do ar variou entre 68,8 % e 79,8 % durante a semana, o que contribuiu com a pequena variação do teor de sólidos durante a semana. Os ventos apresentaram velocidade aproximada de 5 m.s^{-1} , os quais não tiveram ação sobre os LD com envoltório, o que justifica os maiores valores do teor de sólidos diários para os LD sem envoltório.

Observações estas que destacam a importância da ação complementar das variáveis climáticas na fase de secagem dos sistemas naturais LD.

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos resultados deste trabalho possibilitou o destaque das seguintes considerações:

- Após a realização de testes preliminares com 16 geotêxteis foi possível selecionar três geotêxteis que apresentaram melhor desempenho e qualidade de drenado, sendo estes RT-21, RT-26 e RT-31;

- Quando comparados os sistemas de Leito de Drenagem compostos pelos geotêxteis RT-21, RT-26 e RT-31 da marca BIDIM, e avaliados estes sistemas submetidos a aplicação de lodo nas TAS de $1,75 \text{ kg.m}^{-2}$, $3,5 \text{ kg.m}^{-2}$ e $7,0 \text{ kg.m}^{-2}$ foram selecionados o geotêxtil RT-31 e a TAS de $3,5 \text{ kg.m}^{-2}$. Os Leitos de Drenagem compostos pelo geotêxtil RT-31 apresentaram drenados com menores valores de turbidez quando comparados com os outros. A TAS de $3,5 \text{ kg.m}^{-2}$ foi selecionada considerando a intermediação da necessidade de menores espaços territoriais para a implantação do sistema e da fase de secagem que é mais rápida para menores TAS, justificado pela transferência de calor.

- O tempo de drenagem é maior quanto maiores forem os valores de TAS, de aproximadamente 3 horas para a $\text{TAS} = 1,75 \text{ kg.m}^{-2}$, 7 horas para $\text{TAS} = 3,5 \text{ kg.m}^{-2}$ e de 48 h para a $\text{TAS} = 7,0 \text{ kg.m}^{-2}$;

- O período de armazenamento prolongado altera o pH do lodo, o que altera propriedades do lodo como a estabilidade dos flocos formados nas ETAs, tornando estes mais frágeis e fáceis de serem quebrados. As alterações do lodo, como observado em trabalhos anteriores, consequentemente alteram a drenabilidade pelo geotêxtil;

- O comportamento da vazão, na fase de drenagem, é inversamente proporcional ao comportamento do volume de drenado acumulado, devido à obstrução dos poros do geotêxtil pelas partículas do lodo retidas na manta geotêxtil;

- Os primeiros 15 minutos de drenagem fornecem um drenado de água livre com maiores valores de turbidez, metais, DQO e DBO, valores estes que são reduzidos após os 15 primeiros minutos, menor a TAS maior a redução do valor dos parâmetros. A redução de turbidez para a TAS de $1,75 \text{ kg.m}^{-2}$ foi de 93,6%, $3,5 \text{ kg.m}^{-2}$ foi de 91,6% e para a TAS de $7,0 \text{ kg.m}^{-2}$ foi de 57,7%;

- De acordo com os parâmetros avaliados para determinação da água como sendo potável o drenado não pode ser recirculado na etapa de filtração do processo de tratamento de água por apresentar valores de manganês superiores ao estabelecido pela Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde (2011). Logo, se faz necessário o estudo de sistemas que quando acoplados ao LD permitam a classificação do drenado como água potável;

- Quando comparados os valores dos parâmetros avaliados do drenado do sistema composto pelo geotêxtil RT-31 submetido à TAS de 7,0 kg.m⁻², com os estabelecidos pela resolução CONAMA 430 (2011) e COPAM/CERH-MG (2008) o drenado poderá ser descartado diretamente nos cursos de água. No entanto são necessários mais estudos que confirmem essa possibilidade de descarte diretamente nos cursos hídricos;

- A importante ação conjunta e complementar das variáveis climáticas, no processo de desidratação do lodo. Sozinha nenhuma das variáveis climáticas é suficiente para a efetiva desidratação do lodo, no entanto, foi possível observar a significativa influência das variáveis climáticas, de forma a acelerar ou retardar, no processo de desidratação do lodo. Demonstrado pelos maiores valores de teor de sólidos para os sistemas sem envoltório, quando comparados aos sistemas com envoltório. A ação das variáveis climáticas avaliadas está demonstrada na Tabela 18.

Tabela 18 - Ação das variáveis climáticas no processo de desidratação do lodo.

<i>Variáveis climáticas</i>		<i>Temperatura</i>	<i>Umidade</i>	<i>Ventos</i>	<i>Orvalho</i>	<i>Radiação solar</i>	<i>Pluviosidade</i>
<i>Valores das variáveis</i>	<i>altos</i>	positivo	negativo	positivo	negativo	positivo	negativo
	<i>baixos</i>	negativo	positivo	negativo	positivo	negativo	positivo

Positivo: favorável ao processo de desidratação do lodo;

Negativo: desfavorável ao processo de desidratação do lodo.

Fonte: Autor

Foi possível comprovar o desempenho e a eficiência dos sistemas de LD no desaguamento de lodo de ETA, no entanto, são necessários mais estudos sobre o tema, diante do contexto político e ambiental dos últimos anos, os quais exigem providências das ETAs para a garantia da manutenção e preservação do meio ambiente, com destaque para os recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENTAL ASSOCIATION (WEA). **Standard methods for the examination of water & wastewater**, 21 ed., 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos sólido - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.216**: Projeto de Estação de Tratamento de Água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.553**: Geotêxteis. Rio de Janeiro, 1991.

ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. **Gerenciamento de lodo de ETAs - Remoção de água livre através de Leitos de secagem e Lagoas**. Anais...Joinvile: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental , 2003.

ACHON C. L., BARROSO M. M., CORDEIRO J. S. LD: Sistema natural para redução de volume de lodo de Estação de Tratamento de Água. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 13, n. 1, p. 54-62, 2008.

AYDILEK A. H., EDIL T. B. Filtration Performance of Woven Geotextiles with Wastewater Treatment Sludge. **Geosynthetics International**, v. 9, n. 1, p. 41-69, 2002.

AYDILEK A. H., EDIL T. B. Long-term filtration performance of nonwoven geotextile-sludge systems. **Geosynthetics International**, v.10, n. 4, p. 110-123, 2003.

BABATUNDE A. O., ZHAO Y. Q. Constructive Approaches Toward Water Treatment Works Sludge Management: An International Review of Beneficial Reuses. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 37, n. 2, p. 129-164, 2007.

BARROSA M. R. **Princípios Fundamentais da transferência de calor**. 2004. 48f. Trabalho (Graduação) –Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2004.

BARROSO, M. M. Influencia das micro e macropropriedades dos lodos de Estações de Tratamento de Águas no desaguamento por LD. 2007. 249f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR), São Carlos, 2007.

BIDIM. Especificações técnicas – Geotêxteis BIDIM. São José dos Campos – SP, 2011. Material fornecido pela IDIM.

BRASIL. Lei nº9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Lex:** Política Nacional de Recursos Hídricos, 1997.

BRASIL. Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. **Lex:** Crimes Ambientais, 2998.

BRASIL. Lei nº12.305, de 2 de agosto de 2010. **Lex:** Política Nacional de Resíduos Sólidos, 2010.

BRASIL. Portaria do Ministério da Saúde nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. **Lex:** Ministro de Estado da Saúde, no uso das atribuições que lhe conferem os incisos I e II do parágrafo único do art. 87 da **Constituição Federativa do Brasil**, dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

CARNEIRO A. L. S., DINIZ H. N., SILVA V. H. A., JUNIOR N. G. P., MENDES C. G. N. **Avaliação dos aquíferos da cidade de Jacareí - SP, através da caracterização hidrogeológica de poços tubulares profundos.** Anais... Campo Grande/MS: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

COFIE O. O., AGBOTTAH S., STRAUSS M., ESSEKU H., MONTANGER A., AWUAH E., KONE D. Solid-liquid separation of faecal sludge using drying beds in Ghana: Implications for nutrient recycling in urban agriculture. **Water research**, n.40, p. 75-82, 2006.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Lex:** Diário Oficial da União, n.053, p. 58-63, 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente- CONAMA, 2011.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (COPAM), CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE MINAS GERAIS (CERH-MG). Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01, de 05 de maio de 2008.

CORDEIRO J. S. **O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de águas.** 1993. 342f. Tese (doutorado)- Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), São Carlos, 1993.

CORDEIRO J. S., SALES A., POSSATO J. F., COSTA C. R., SOUZA F. R., ACHON C. L., BUTLER A. M., FREITAS A. A. Remoção de água de lodo de ETAs através de leitos de secagem modificados e incorporação da fase sólida em matrizes de cimento inclusive com o reaproveitamento do entulho de construção. 282p. Separata de: ANDREOLI C. V. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. PROSAB 2 – TEMA IV.** Rio de Janeiro, 2001.

DAVID A. C. **Secagem térmica de lodo de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio.** 2002. 163f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2004.

DI BERNARDO L., A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**– Volume 1. 2 ed. São Carlos: Rima, 2005.

FONTANA, A. O. **Sistema de LD e Sedimentador como solução para redução de volume de lodo de Decantadores e Reuso de água de Lavagem de Filtros – Estudo de Caso – ETA Cardoso.** 2004. 164f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR), São Carlos, 2004.

IBGE/PNSB - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA/PESQUISA NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO. **Serviços de saneamento básico, Abastecimento de água.** Rio de Janeiro, 2010 Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>. Acesso em: 21 de nov. 2012.

Instituto Nacional de Metereologia (Inmet). **Estações Automáticas.** Uberlândia-MG, 2012. Dados da Estação Automática: Uberlândia (MG).

KOERNER G. R., KOERNER R. M. Leachate Flow Rate Behavior through Geotextile and Soil Filters and Possible Remediation Methods. **Geotextiles and Geomembranes**, n.11, p. 401-430, 1992.

LIMA G. F. C. O debate da Sustentabilidade na sociedade insustentável. **Revista eletrônica "Política e Trabalho"**, p. 201-202, 1997. Disponível

em:<<http://www.cefetsp.br/edu/eso/debatesustentabilidade.html>>. Acesso em: 22 out. 2012.

MARTEL C. J. Dewaterability of freeze-thaw conditioned sludges. **Journal WPCF**, v. 61, n. 2, p. 237-241, 1989.

MENDONÇA M. B., CAMMAROTA M. C, FREIRE D. D. C. EHRLICH, M. A new procedure for treatment of oily slurry using geotextile filters. **Journal of Hazardous Materials**, n. 110, p. 113–118,2004.

MINAS GERAIS. Lei nº13.199, de 29 de janeiro de 1999. **Lex:Política Estadual de Recursos Hídricos**, 1999.

MORTARA F. C. **Utilização de LD no desaguamento de lodos anaeróbios.** 2011. 242f.Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR), São Carlos, 2011.

MOTT G. J., ROMANOW S. Sludge characterization, removal and dewatering. **Journal of Harzardous Materials**, n. 29, p. 127-140, 1992.

NASSAR A. M., MCIWEM M. S., AFIFI S. Sludge dewatering using the reed bed system in the Gaza Strip, Palestine. **Water and Environment Journal**, v.20, n.1, p. 27–34, 2006.

NIELSEN S., WILLOUGHBY N. Sludge treatment and drying reed bed systems in Denmark. **Water and Environment Journal**, v. 19, n. 4, p. 296-305, 2005.

OLIVEIRA A. L. Floto-filtração como pós tratamento do efluente de reator anaeróbico tratando esgoto sanitário. 2007. 233f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos (USP). São Carlos, 2007.

PALMEIRA E. M., FANIN R. J., VAID Y. P. A study on the behaviour of soil-geotextile systems in filtration tests. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 33, n. 6,p. 899-912, 1996.

REALI M. A. P. **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água - PROSAB.** Rio de Janeiro : ABES, 240 p, 1999.

SANSONE L. J., KOERNER R. M. Fine Fraction Filtration Test to Assess Geotextile Filter Performance. **Geotextiles and Geomembranes**, v.11, n. 4–6, p. 371-39, 1992.

SILVEIRA ET. AL., ET. A., C.; LIMA M. S. P.; MACEDO J. G.; SILVA S. M. C. P.; KURODA E. K. **Desaguamento de lodo de Estações de Tratamento de Águas – ETAs por LD com mantas geotêxteis – escala reduzida.** Anais...Porto Alegre/RS: 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2011.

SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL DE REGULARIZAÇÃO AMBIENTAL DO TRIÂNGULO MINEIRO E ALTO PARANAÍBA. Processo Administrativo (PA) COPAM nº. 20273/2009/001/2010, de 14 de outubro de 2010.

THÉRIAULT, S. M. **The use of Geotextile Membranes for the dewatering of Aerobically Digested Sludge.** 1991.11f. Dissertação (Mestrado): The University of New Brunswick, Canadá, 1991.

UGGETTI E., LLORENS E., PEDESCOLL A., FERRER I., CASTELLNOU R., GARCIA J. Sludge dewatering and stabilization in drying reed beds: Characterization of three full-scale systems in Catalonia, Spain. **Bioresource Technology**, n. 100, p. 3882-3890, 2009.

VIDAL D. M. Geotêxtil: Propriedades e Ensaios. In: engenheiros BIDIM. Manual Técnico Geossintéticos Bidim, [199-].Disponível em: <<http://www.impercia.com.br/tecnologias/DRENAGEM/ARTIGOS%20TECNICOS/GEOTEXTIL%20PROPRIADES%20E%20ENSAIOS.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2012.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Volume 1: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 2. ed.Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 1996.

WILLIAMS N. D. Evaluation of geotextile/soil filtration characteristics using the hydraulic conductivity ratio analysis. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 8, n.1, p. 1–26, 1989.

WOOD J., FERNANDEZ G., BARKER A., GREGORY J., CUMBY T. Efficiency of reed beds in treating dairy wastewater. **Biosystems Engineering**, v. 98, n. 4, p. 455-469, 2007.

APÊNDICES

Apêndice 1 – Dados referentes às variáveis climáticas do segundo dia avaliado para TAS=1,75kg.m⁻².

Data	Horário de Brasília	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Pto. Orvalho (°C)	Vento (m/s)	Radiação(kJ/m ²)	Chuva (mm)
16/10/2012	9	25	54	15,2	9,8	2188	0
16/10/2012	10	26,7	49	15,2	10,7	2761	0
16/10/2012	11	27,4	47	15	9,4	3298	0
16/10/2012	12	28,1	44	14,9	9,6	2894	0
16/10/2012	13	29,3	41	14,6	9,2	2699	0
16/10/2012	14	29,4	40	14,5	8,8	2509	0
16/10/2012	15	28,7	41	14	8,8	806,3	0
16/10/2012	16	28,8	41	14,2	5,8	647,2	0
16/10/2012	17	28,2	44	14,7	5,1	312,3	0
16/10/2012	18	23,3	71	17,9	9,1	45,54	0,6
16/10/2012	19	20,9	82	17,7	8,2	-2	1,8
16/10/2012	20	19,4	92	18,1	3	-3,41	6,4
16/10/2012	21	19,3	92	18	2,3	-3,14	3,8
16/10/2012	22	19,1	93	17,9	2,1	-3,53	1
16/10/2012	23	19,4	90	17,7	3,8	-3,29	0
17/10/2012	0	19,3	89	17,5	4,1	-3,28	1
17/10/2012	1	18,9	92	17,7	5,1	-3,52	0,2
17/10/2012	2	19	91	17,5	5	-3,51	0,6
17/10/2012	3	19,3	86	17	6,6	-2,72	0
17/10/2012	4	19,5	85	16,9	4,5	-1,95	0
17/10/2012	5	19,4	85	16,9	5,4	-1,63	0
17/10/2012	6	19	91	17,4	6,2	5.478	0
17/10/2012	7	19,7	89	17,8	6,7	306,1	0
17/10/2012	8	21,3	79	17,5	7,4	1385	0
Média		22,85	71,16667	16,49167	6,529167	10,54061	15,4

Fonte: Adaptado do Instituto Nacional de Metereologia (Inmet), 2012.

Apêndice 2 - Dados referentes às variáveis climáticas do quinto dia avaliado para TAS=3,5kg.m⁻².

Data	Horário de Brasília	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Pto. Orvalho (°C)	Vento (m/s)	Radiação(kJ/m ²)	Chuva (mm)
12/10/2012	15	25,1	67	18,5	11,3	223,6	0,4
12/10/2012	16	23,3	71	17,7	7,2	215,7	0
12/10/2012	17	21,6	75	17	7,2	172,1	0
12/10/2012	18	23,5	66	16,7	3,9	40,52	0
12/10/2012	19	22,6	76	18,2	7	-2,13	0,2
12/10/2012	20	20,4	89	18,5	7	-2,38	4
12/10/2012	21	20,1	90	18,4	3,9	-3,43	0,2
12/10/2012	22	19,8	91	18,3	3,9	-3,54	1
12/10/2012	23	19,8	89	18	2,9	-3,54	0,6
13/10/2012	0	19,5	91	18	4,2	-2,8	0
13/10/2012	1	20,1	87	17,8	4,2	-3,41	0
13/10/2012	2	19,6	89	17,8	3,4	-3,16	0
13/10/2012	3	19,3	89	17,5	5,2	-3,54	0
13/10/2012	4	19,3	88	17,3	6,1	-3,54	0
13/10/2012	5	19,8	83	16,7	6,3	-3,53	0
13/10/2012	6	19,4	84	16,7	5	7.526	0
13/10/2012	7	20,1	82	17	5,3	375,5	0
13/10/2012	8	21,2	80	17,5	6,8	934,2	0
Média		20,80556	82,61111	17,64444	5,6	5,251456	6,4

Fonte: Adaptado do Instituto Nacional de Metereologia (Inmet), 2012.

Apêndice 3 - Dados referentes às variáveis climáticas do sexto dia avaliado para TAS=3,5kg.m⁻².

Data	Horário de Brasília	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Pto. Orvalho (°C)	Vento (m/s)	Radiação(kJ/m ²)	Chuva(mm)
13/10/2012	9	22,6	74	17,6	7	1416	0
13/10/2012	10	25	63	17,5	6,5	2731	0
13/10/2012	11	26,9	55	17,1	5,9	3261	0
13/10/2012	12	28,3	48	16,4	5,9	3541	0
13/10/2012	13	29,3	44	15,9	5,3	2716	0
13/10/2012	14	29,4	41	14,8	4,6	2279	0
13/10/2012	15	30,3	38	14,4	4,4	2461	0
13/10/2012	16	31,1	36	14,4	4,4	2217	0
13/10/2012	17	25,7	60	17,4	6,7	684	0,8
13/10/2012	18	22,2	77	18	9,7	128,8	10,4
13/10/2012	19	23,2	72	18	6,5	0,791	0
13/10/2012	20	22,5	71	17,1	5,8	-3,39	0
13/10/2012	21	21,8	79	18,1	6	-3,54	0
13/10/2012	22	20,6	87	18,4	7,8	-3,54	0
13/10/2012	23	20,6	82	17,4	8,8	-3,54	0
14/10/2012	0	20,4	82	17,2	6,9	-3,54	0
14/10/2012	1	20,2	83	17,3	5,6	-3,54	0
14/10/2012	2	20	85	17,5	5,9	-3,54	0
14/10/2012	3	19,9	87	17,6	5,9	-3,54	0
14/10/2012	4	19,8	87	17,6	6,1	-3,54	0
14/10/2012	5	19,5	88	17,5	5,5	-3,54	0
14/10/2012	6	19,4	87	17,1	6,3	7.370	0
14/10/2012	7	20,5	80	16,9	7	455,1	0
14/10/2012	8	21,1	77	16,9	9	1190	0
Média		23,34583	70,125	17,00417	6,395833	12,6731	11,2

Fonte: Adaptado do Instituto Nacional de Metereologia (Inmet), 2012

Apêndice 4 - Dados referentes às variáveis climáticas do sétimo dia avaliado para TAS=7,0kg.m⁻².

Data	Horário de Brasília	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Pto Orvalho (°C)	Vento (m/s)	Radiação (kJ/m ²)	Chuva(mm)
31/10/2012	11	32,4	31	13,2	5,9	2776	0
31/10/2012	12	33,7	29	13,2	5,1	3254	0
31/10/2012	13	35,2	25	12,4	4,6	3472	0
31/10/2012	14	34,7	24	11,2	4,8	2649	0
31/10/2012	15	24,3	58	15,4	11,9	199,1	0
31/10/2012	16	27,8	45	15	11,6	285,6	0
31/10/2012	17	31	35	13,6	5	1050	0,2
31/10/2012	18	30,5	38	14,7	6,3	835,7	0,2
31/10/2012	19	30,6	33	12,6	6,3	511,7	0,2
31/10/2012	20	28,4	43	14,6	1,8	13,47	0,2
31/10/2012	21	28	42	13,9	2,2	-3,54	0
31/11/2012	22	27	47	14,8	0,8	-3,54	0,2
31/11/2012	23	27,7	40	12,8	3,4	-3,53	0,2
01/11/2012	0	26,3	48	14,5	3,4	-3,54	0,2
01/11/2012	1	27,1	46	14,6	2,5	-3,28	0,2
01/11/2012	2	26,5	49	14,9	2,8	-3,2	0
01/11/2012	3	24,6	59	16	7,5	-3,52	0,4
01/11/2012	4	23,4	63	16	7,4	-3,18	0,4
01/11/2012	5	23,1	62	15,5	4,5	-3,29	0,6
01/11/2012	6	21,2	80	17,7	4,7	-3,54	0,2
01/11/2012	7	21,6	79	17,8	5,4	-3,22	0,2
01/11/2012	8	22,2	75	17,5	6,5	112,1	0,2
01/11/2012	9	23,2	76	18,8	4,9	563,7	0
01/11/2012	10	24,3	73	19,1	4,5	1514	0
Média		27,28333	50	14,99167	5,158333	7,166246	3,6

Fonte: Adaptado do Instituto Nacional de Metereologia (Inmet), 2012